

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

На правах рукописи



ЮРОВ ПАВЕЛ ЮРЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРОИТЕЛЬНОЙ 3D-ПЕЧАТИ
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РЕЖИМОВ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Славчева Галина Станиславовна,
доктор технических наук, профессор

Воронеж - 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	14
1.1 Проблемы обеспечения качества строительных объектов, возводимых с применением аддитивных технологий (3D-печати).....	14
1.2 Анализ существующих подходов к управлению процессом строительной 3D-печати	17
1.2.1 Анализ методов и подходов к управлению процессом 3D-печати на проектной стадии	18
1.2.2 Анализ методов и подходов к управлению процессом 3D-печати на технологической стадии.....	23
1.3 Разработка факторов и способов управления технологическим процессом строительной 3D-печати.....	27
1.4 Цель, задачи и блок-схема исследования	34
1.5 Выводы по главе 1.....	36
2 МЕТОДЫ ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	38
2.1 Характеристика материалов.....	38
2.2 Этапы эксперимента и факторное пространство исследований	40
2.3 Характеристика методов исследования.....	48
2.3.1 Методы исследования реологических и технологических свойств смеси	48
2.3.2 Методы исследования модельных 3D-печатных элементов	52
2.3.3 Методика численного моделирования	58
2.3.4 Методика опытно-промышленной апробации технологических параметров процесса 3D-печати.....	63

2.4 Выводы по главе 2.....	74
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	76
3.1 Определение исходных требований к параметрам процесса 3D-печати.....	76
3.1.1 Исследование моделей реологического поведения вязко-пластичных цементных смесей.....	76
3.1.2 Исследование взаимосвязи между моделью реологического поведения и качеством 3D-печатных объектов.....	78
3.1.3 Установление взаимосвязи между моделями реологического поведения смесей для 3D-печати при сдвиге и сдавливании.....	83
3.1.4 Численное моделирование процесса 3D-печати	87
3.2 Обоснование комплексного критерия оценки технологичности смесей для 3D-печати	93
3.2.1 Разработка прибора для оперативного контроля пластичности смесей для 3D-печати.....	93
3.2.2 Верификация прибора для оперативного контроля пластичности смесей для 3D-печати	98
3.2.3 Обоснование требований к значениям пластической прочности смеси для 3D-печати.....	104
3.3 Определение требований к параметрам контроля и диапазону регулирования технологических режимов 3D-печати.....	110
3.3.1 Установление корреляционной взаимосвязи между значениями реологических и технологических параметров пластичности смесей....	110
3.3.2 Определение точки оперативного контроля показателя технологичности смеси для 3D-печати	114
3.3.3 Определение требований к параметрам контроля и диапазону регулирования технологических режимов 3D-печати.....	115

3.4 Выводы по главе 3.....	118
4 ПРИКЛАДНЫЕ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЕ	121
4.1 Результаты опытно-промышленной апробации	122
4.2 Практические рекомендации по контролю и управлению производственным циклом строительной 3D-печати	132
4.3 Оценка эффективности и внедрение разработок.....	138
4.4 Выводы по главе 4.....	144
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	149
Приложение А. Техническое задание ВГТУ	164
Приложение Б. Свидетельство на секрет производства (ноу-хау) «Технологический комплекс для строительной 3D-печати»	170
Приложение В. Порядок создания и подготовка к печати CAD-моделей строительных изделий	171
Приложение Г. Свидетельство на секрет производства (ноу-хау) «Устройство для оценки пластичности цементных смесей».....	176
Приложение Д. Свидетельство на секрет производства (ноу-хау) «Методика и устройство оценки пластичности цементных смесей»	177
Приложение Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026610930	178
Приложение Ж. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026661582	179
Приложение З. Патент на полезную модель, «Устройство для измерения пластичности неорганических паст» №244065.....	180
Приложение И. Патент на полезную модель, «Устройство для измерения пластичности неорганических паст» №244271.....	181
Приложение К. Акт внедрения в производство БЕТОНИКАРТ.....	182
Приложение Л. Акт внедрения в производство KEYCODE.....	183

Приложение М. Акт экспертизы 3D-моделей.....	184
Приложение Н. Инструкция подготовки CAD-моделей изделий для строительной 3D-печати.....	191
Приложение О. Методика измерения пластической прочности смесей, готовых к употреблению в технологии строительной 3D-печати.....	197
Приложение П. Инструкция по изготовлению строительных изделий методом 3D-печати.....	201
Приложение Р. Акт внедрения результатов исследований в учебный процесс.....	205

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Анализ российского рынка аддитивного производства (АП) показывает все большее повышение ценности аддитивных технологий как инструмента для поддержания гибкости производств в различных отраслях. В стоимостном выражении российский рынок АП (оборудование, программное обеспечение, материалы, поставки, производство по запросу) вырос с 2021 г. по 2022 г. на 33,9%, с 2022 по 2023 г. на 60,1%, с 2023 г. по 2025 г. на 42,3%. В период 2024-2025 г.г. основной объём роста пришёлся на оборудование (11,8 млрд рублей), сегмент материалов для 3D-печати составил 5,4 млрд рублей, ещё 5 млрд рублей обеспечили услуги. В базовом сценарии среднегодовая динамика в 2024-2030 годах оценивается в 4,2%, в целевом - в 7,9%, в инновационном - в 21,2%. Ожидается, что рынок будет расти в среднем на 19,15% ежегодно в 2026-2031 годах, чему способствует сочетание промышленной модернизации и государственной поддержки импортозамещения.

Однако в секторе аддитивного строительного производства (АСП) наблюдается отставание от обозначенных темпов роста. В постановлении Правительства РФ от 14.07.2021 г. «Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в РФ на период до 2030 г.» данное направление пока квалифицировано как технология для формирующихся рынков будущего, то есть технологические решения ещё не сформированы, но потенциально способны обеспечить значительный объём потребления в перспективе.

Несмотря на активное создание и внедрение промышленных образцов оборудования, широкомасштабное внедрение технологии в значительной мере сдерживается нерешённостью задач комплексного системного управления процессом. Практика управления строится на ручной настройке технологических режимов 3D-печати оператором, что приводит к дефектам строительных изделий и конструкций, ограничивает возможности масштабирования технологии. Таким образом, актуальной научно-технической задачей является

совершенствование технологического процесса строительной 3D-печати для обеспечения стабильного качества конструкций и сооружений.

Степень разработанности темы. Проблема управления процессом строительной 3D-печати находится на стыке реологии дисперсных систем, математического моделирования, компьютерной симуляции (виртуального прототипирования), методов контроля и управления технологическими процессами. Фундаментальные основы реологии неорганических дисперсных систем заложены в трудах П.А. Ребиндера, Н.Б. Урьева, Н.В. Михайлова. В работах G.H. Tattersall, P.F.G. Banfill, C.F. Ferraris, N. Roussel, основанных на теории потока при сдавливании, разработаны методы оценки реологического поведения вязко-пластичных систем, адаптированных к процессу экструзионной строительной 3D-печати. Математическое моделирование процесса печати с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD) доступно для реализации в программных комплексах ANSYS Fluent, Flow-3D, COMSOL Multiphysics и др. В работах N. Roussel, A. Perrot, R. Comminal, A.V. Rahul, Y. Tao разработаны численные модели, которые позволяют достаточно эффективно прогнозировать качество единичного слоя, устойчивость объектов простой геометрии в статических условиях. Однако разработанные модели не учитывают реальные реологические и технологические свойства смесей, не интегрированы в процесс управления. В работах M. Sonebi, M.T. Souza, R. Wolfs предложены отдельные методы и средства контроля качества и управления процессом строительной 3D-печати. Однако эти методы и средства также не интегрированы в контур управления, основаны на фиксации уже возникших дефектов, а не их предотвращении. Также отсутствуют специализированные приборы для контроля качества смесей для строительной 3D-печати.

Объект исследования - процесс строительной 3D-печати, включая моделирование, технологические режимы экструзии и послойной укладки.

Предмет исследований - методы, средства моделирования, контроля и управления процессом строительной 3D-печати, основанные на взаимосвязи

между варьируемыми параметрами процесса, реологическими и технологическими свойствами смесей.

Научная гипотеза. Предполагается, что управление процессом строительной 3D-печати должно быть основано на учете взаимосвязи между реологическим поведением, технологическими свойствами вязко-пластичных смесей и параметрами процесса. Установление такой взаимосвязи позволит достоверно обосновать требования к средствам моделирования и прототипирования, методам проектирования, технологическим способам контроля и регулирования технологического процесса. На этой основе предполагается разработать и (или) усовершенствовать модели, методы и адаптивный алгоритм управления режимами печати, обеспечивающими бездефектность экструзионных слоев, разработать системы, обеспечивающие геометрическую точность и устойчивость конструкций.

Целью диссертационной работы является совершенствование методов создания строительных изделий посредством аддитивных технологий (3D-печати) на основе моделирования и контроля технологического процесса.

В соответствии с поставленной целью сформулированы следующие задачи исследований:

1. Разработка концепции исследований на основе критического анализа существующих подходов, идентификации факторов, способов моделирования и управления процессом строительной 3D-печати.

2. Разработка методики, обоснование факторного пространства и средств исследований.

3. Исследование взаимосвязи качества модельных строительных конструкций с реологическими и технологическими свойствами цементных смесей и обоснование требований к их значениям.

4. Численное моделирование процесса 3D-печати и экспериментальная верификация его результатов.

5. Обоснование требований к технологическим режимам 3D-печати, определяемых на основе численного моделирования и экспериментальных исследований.

6. Разработка комплексной системы контроля и регулирования производственного цикла 3D-печати и практических предложений по ее использованию.

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

1. 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» (2022-2026 гг.).

2. Грант Российского научного фонда, проект 25-79-10182 «Разработка принципов создания архитектурных цементных композитов и изделий с оптическими свойствами для строительных аддитивных технологий» (2025-2028 г.г.).

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

Разработки отмечены дипломом победителя полуфинала конкурса по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (УМНИК), г. Воронеж, 2021г.; грамотой за победу в конкурсе «Мой первый Start-up», г. Воронеж; дипломом участника конкурса выпускных квалификационных работ Всероссийского инженерного конкурса в номинации «лучшая квалификационная работа магистра», г. Москва, 2022г.

Научная новизна работы.

1. Разработано новое устройство оперативного контроля пластичности готовых к употреблению смесей для 3D-печати и его программное обеспечение, гарантирующее контроль пластической прочности в диапазоне 0,4-4,0 кПа, что делает его универсальным для контроля технологических свойств различных неорганических вязко-пластичных паст.

2. Впервые экспериментально установлена взаимосвязь между качеством 3D-печатных объектов и моделями реологического поведения цементных смесей при сдвиге и в условиях действия нормальных напряжений (при сдавливании); определены требования к значениям реологических

характеристик цементных смесей, при которых обеспечивается бездефектность экструзионных слоев и устойчивость 3D-печатных объектов.

3. Усовершенствована численная методика и уточнены параметры реологической модели Хершеля-Балкли, что позволило с высокой достоверностью прогнозировать геометрию печатных слоёв и устойчивость 3D-печатных строительных изделий.

4. Предложены экспериментально-статистические зависимости между оперативной характеристикой пластической прочности $P_{пл}$, оценкой предела пластичности при сдавливании $K_i(I)$, устойчивостью 3D-печатных структур, позволяющие интегрировать результаты численного моделирования и данные оперативного контроля в систему управления технологическим процессом строительной 3D-печати.

5. Определены обобщённые критерии устойчивости 3D-печатных структур, включая допустимые диапазоны реологических и технологических параметров смеси, граничные значения входных параметров для численного моделирования процесса; пределы регулирования технологических режимов 3D-печати.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании приоритетной роли взаимосвязи между реологическим поведением, технологическими свойствами вязко-пластичных смесей и параметрами процесса строительной 3D-печати в обеспечении качества строительных изделий; в совершенствовании методов численного моделирования и средств регулирования технологических режимов, гарантирующих геометрическое соответствие, бездефектность и устойчивость изделий в процессе безопалубочной печати.

Практическая значимость работы заключается:

- в разработке алгоритма и технологических инструкций управления процессом 3D-печати, включая процедуру подготовки CAD-моделей строительных изделий; численное моделирование процесса с учетом вариативности технологических характеристик смесей, процедуру управления процессом печати на строительном 3D-принтере;

- в разработке устройства и методики лабораторного и оперативного контроля технологических характеристик смесей, готовых к употреблению в строительной 3D-печати.

Методология и методы исследования включают системный анализ технологического процесса как объекта управления; экспериментальные методы сдвиговой и сдвигающей реометрии для установления реологических зависимостей; моделирование процесса укладки цементной смеси (ANSYS Fluent, метод конечных объемов) с верификацией по данным физического эксперимента; методы статистической обработки и корреляционного анализа для установления взаимосвязей; опытно-промышленную апробацию на промышленном принтере.

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты исследований взаимосвязи между качеством 3D-печатных объектов, моделями реологического поведения, реологическими и технологическими характеристиками цементных смесей.
2. Метод и устройство оценки технологических свойств смесей, готовых к употреблению в 3D-печати.
3. Результаты численного моделирования и прогнозирования геометрии печатных слоёв и устойчивости 3D-печатных объектов в программном комплексе «ANSYS Fluent».
4. Обобщённые критерии устойчивости печатных структур и диапазон регулирования параметров процесса 3D-печати.
5. Алгоритм и процедуры контроля и управления процессом 3D-печати, включая моделирование процесса на проектной стадии, контроль и управление экструзией и послойной укладкой на технологической стадии.

Степень достоверности полученных результатов. Подтверждается применением аттестованного оборудования Центра Коллективного Пользования им. профессора Ю.М. Борисова ВГТУ, лицензионного программного обеспечения ANSYS Fluent. Серия экспериментальных исследований

воспроизведена в реальных производственных условиях. Полученные данные не противоречат общепризнанным фактам и исследованиям других ученых.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования были представлены на следующих конференциях: международная научная конференция «IDEA2» (Казань, 2025); V Международная научно-техническая конференция «International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (MPCPE-2024)» (Владимир, 2024 г.); ежегодная научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов ВГТУ (Воронеж, 2022-2026).

Внедрение результатов работы. Методы контроля строительной смеси для 3D-печати апробированы и внедрены в процесс производственного контроля ООО «БетоникАРТ». Методика математического моделирования процесса 3D-печати апробирована компанией ООО «КЕЙКОД» при изготовлении строительных 3D-принтеров. Результаты диссертационного исследования 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. заключается в определении актуальности темы диссертации, в постановке цели и задач исследования, выполнении программы экспериментов, формулировке схемы и непосредственной отработке вычислительных экспериментов, анализе и обработке полученных результатов, написании текста диссертации, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, написании программ для ЭВМ и программного обеспечения для устройства-пластометра, внедрении полученных результатов в практику, а также публикации результатов диссертации в научных изданиях.

Соавторы не возражают против использования соискателем совместных работ. Личный вклад Юрова П.Ю. в полученных результатах составляет не менее 75%.

Публикации. Основные результаты и положения диссертационных исследований представлены в 6 публикациях, из которых 4 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК РФ, 2 - в изданиях, входящих в ядро РИНЦ. Так же получено 2 свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ; 2 патента на полезную модель, 3 свидетельства на секрет производства (ноу-хау).

Структура и содержание исследования. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 205 страницах, содержит 58 рисунков и фотографий, 26 таблиц, 16 приложений. Список литературы включает 140 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:

2. Разработка математических моделей физико-механических, химических, биологических, гидромеханических и тепломассообменных процессов, оптимизирующих параметры структуры, режимы изготовления и свойства строительных материалов и изделий.

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

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

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность доктору технических наук, профессору Тульского государственного университета Теличко В.Г. за методическую помощь и консультации при постановке, реализации и анализе результатов численного моделирования.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Проблемы обеспечения качества строительных объектов, возводимых с применением аддитивных технологий (3D-печати)

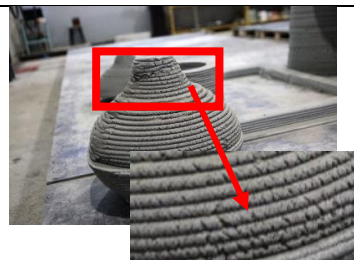
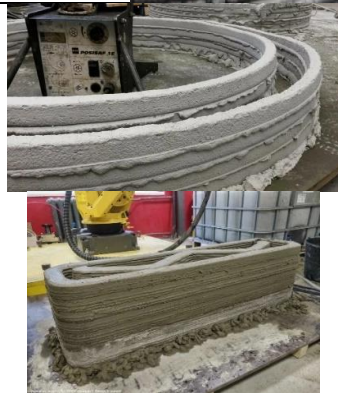
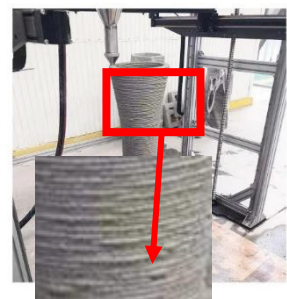
На первоначальном этапе аддитивные технологии (3D-печать) в строительстве позиционировались как революционная альтернатива традиционному строительному производству. Предполагалось, что технология позволит возводить сложные конструкции без опалубки, обеспечивая большую гибкость проектирования, а также повысить эффективность использования материалов, сокращая количество отходов [1-3]. Технический, экономический и экологический потенциал аддитивного строительного производства (АСП) связывался с ускорением всех этапов строительного производства, обусловленный возможностями цифрового проектирования и роботизации строительных процессов [4-8].

Однако, несмотря на почти 30-летний период развития, указанный потенциал АСП не реализован, данные технологии все еще имеют ограниченное применение в строительной практике. Это во многом обусловлено тем, что качество 3D-печатных строительных объектов уступает традиционным, а сроки и затраты на их возведение сопоставимы с ними.

Наиболее часто встречающиеся дефекты печатных объектов представлены в таблице 1.1. Характерными причинами возникновения дефектов являются:

- низкое качество смеси,
- трудно определяемые и нерациональные параметры технологического процесса печати (скорость подачи материала, скорость перемещения экструдера и т.д.), а также отсутствие возможности их оперативного регулирования при изменении характеристик смеси.

Таблица 1.1 – Дефекты строительных объектов, возводимых с применением аддитивных технологий (3D-печати)

Виды дефектов	Описание дефекта	Возможные причины возникновения	Возможные последствия для эксплуатации	Примеры
Разрывы слоя (по длине и между слоями)	Нарушение сплошности слоя, появление пустот в слое или отсутствие сцепления между соседними слоями	Основной причиной является использование малоподвижных, малотекучих смесей для строительной 3D-печати, что приводит к образованию дефектов структуры	Появление таких дефектов ведет к снижению эксплуатационных характеристик, постольку данные места являются концентраторами напряжений	
Нарушение геометрии	Потеря проектной формы слоя под собственным весом, чрезмерное растекание смеси, «оплывание» углов и вертикальных стенок	Причиной является использование слишком жидких, высокоподвижных смесей, а также использование режимов печати, не подходящих под данный тип смеси	Такой дефект приводит к возможности разрушения конструкции в процессе печати, а так же ведет к необходимости дополнительной обработки изделия для сглаживания дефектов поверхности	
Разнотолщинность слоя	Неравномерная толщина экструдированного слоя. Может проявляться как при малоподвижных, так и при излишне подвижных смесях	Неравномерная толщина экструдированного слоя. Может проявляться как при малоподвижных, так и при излишне подвижных смесях. Также может быть вызвана неоднородностью смеси, но в большинстве случаев является следствием неточности механики самого 3D-принтера	В современных комплексах механика принтера «живет» отдельно от экструдерной головки, которая управляется вручную и при корректировке в процессе печати оператором параметров могут образовываться дефекты в виде наплывов	

Продолжение таблицы 1.1

Виды дефектов	Описание дефекта	Возможные причины возникновения	Возможные последствия для эксплуатации	Примеры
Трещинообразование	Образование трещин на напечатанных объектах со временем эксплуатации	Сложность конструкции, отсутствие деформационных швов, неправильно подобранный состав	Ускоренное разрушение объекта в местах образования трещин, особенно в условиях переменного климата	
Расслоение по слоям	Разрушение объектов по печатаемым слоям после затвердевания	Неправильно подобранная смесь, долгий временной промежуток между укладкой слоев, нарушение технологии печати	Разрушение объекта в местах сцепления слоев между собой	

Таким образом, для повышения качества 3D-печатных строительных объектов управление и контроль технологическим процессом должны быть основаны на комплексной системе контроля и регулирования всех его стадий, включая контроль качества смеси, регулирование параметров печати в зависимости от изменения характеристик смеси, контроль качества печатных слоев и соответствия геометрии напечатанных объектов их CAD-модели.

1.2 Анализ существующих подходов к управлению процессом строительной 3D-печати

Производственный цикл строительной 3D-печати разделяется на две основные стадии.

1 стадия (проектная): включает создание CAD-модели (3D-модели) объекта, симуляцию процессов печати и поведения объекта в процессе печати.

2 стадия (технологическая) включает:

- перемешивание - получение бетонной смеси с заданными технологическими свойствами;
- транспортировку от узла приготовления к экструдеру;
- экструзию бетонной смеси для формирования единичного слоя;
- послойную безопалубочную укладку по заданной траектории согласно цифровой трехмерной CAD-модели.

Общая системная проблема реализации и внедрения строительных аддитивных технологий заключается в отсутствии комплексных методов непрерывного управления всем производственным циклом строительной 3D-печати. Это требует решения совокупности задач: от точного прогнозирования поведения материала до разработки систем контроля качества печати, геометрического соответствия, чтобы физический объект соответствовал расчетным характеристикам и параметрам исходной модели.

1.2.1 Анализ методов и подходов к управлению процессом 3D-печати на проектной стадии

Для создания CAD-модели объектов строительной 3D-печати используются специальные программные комплексы (ПК), которые в автоматизированном режиме анализируют геометрию, массу, материал и требуемое количество изделий, сопоставляя их с технологическими возможностями имеющегося оборудования.

На следующем этапе выполняется оптимизация CAD-моделей с помощью CAE-систем (конечно-элементного анализа): определяется, где объём материала является избыточным, а где критически важным. Это позволяет создавать облегченные, но обладающие достаточной механической прочностью конструкции, часто со сложными бионическими формами, которые невозможно получить традиционными методами. В модель закладываются ячеистые или сетчатые структуры для придания изделию особых механических свойств, теплоизоляции или звукопоглощения. К сожалению, в существующих методиках на данной стадии не учитываются технологические ограничения, связанные с ориентацией модели при печати и необходимостью генерации поддержек.

После подготовки моделей наступает этап технологической подготовки к производству. Определяется оптимальное положение изделия на платформе принтера, затем оптимизированная модель преобразуется в набор инструкций (программу) для 3D-принтера. Оператор задает технологические параметры: скорость печати, высоту слоя, ширину экструзии, выбираются алгоритмы заполнения внутренних объемов.

Далее должно производиться прогнозирование дефектов и расчет необходимой компенсации деформаций. Суть метода заключается в математическом моделировании физических процессов, происходящих во время печати. В «симулятор» загружаются данные о материале (реология, усадка, теплопроводность), режимах печати (скорость экструзии) и геометрии изделия. Это

позволяет спрогнозировать зоны высоких остаточных напряжений, возможное коробление слоев и другие дефекты еще до запуска печати. К сложностям можно отнести то, что высокая трудоемкость и стоимость полномасштабных расчетов часто не позволяют моделировать процесс во всей полноте (многоуровневое моделирование), поэтому используются упрощенные подходы (например, метод собственных технологических деформаций), которые могут давать существенные погрешности.

Таким образом, основной проблемой на всех этапах здесь является то, что на стадиях создания CAD-моделей и технологической подготовки производства не учитываются динамические реологические изменения смеси во времени и их влияние на максимальную высоту печати без потери устойчивости. Параметры процесса не привязываются к свойствам материала, из-за чего процесс печати «живет» отдельно от смесей, и становится невозможно точно прогнозировать поведение изделия при разных технологических свойствах смеси. Частичным решением проблемы прогнозирования поведения печати может стать математическое моделирование самого процесса, в котором учитывается изменение характеристик смеси во времени.

Для управления процессом печати и прогнозирования поведения объектов в процессе 3D-печати все более активно используются методы численного моделирования (CFD, МКЭ, МДЭ) (таблица 1.2). Моделирование охватывает все ключевые стадии технологического процесса, от экструзии до анализа поведения готовой конструкции.

На стадии экструзии моделируется процесс прохождения бетонной смеси через сопло экструдера. Анализируется влияние скорости вращения шнека, давления и геометрии сопла на формирование экструзионного слоя, производится выявление потенциальных дефектов.

На стадии формирования единичного слоя моделируется укладка одного слоя, его деформирование и геометрия сразу после экструзии.

Таблица 1.2 – Систематизация данных о методах численного моделирования технологического процесса 3D-печати

Масштаб моделирования	Метод и программный комплекс	Описание	Экспериментальная верификация	Источник
Течение через сопло	Метод дискретных элементов (МДЭ, англ. DEM)	Модель МДЭ описывает процесс экструзии при разной скорости вращения шнека и давления в экструдере	Есть	[9]
Единичный слой	Методы вычислительной гидродинамики (CFD), Flow-3D	Оценка влияния поперечного сечения печатного слоя на точность печати конечного продукта	Нет	[10]
Единичный слой	Методы вычислительной гидродинамики, вспомогательная векторная машина (SVM); ANSYS Fluent	Анализ механизма течения смеси в процессе экструзии и укладки. Прогнозирование деформации слоя в зависимости от скорости печати и предела текучести смеси	Есть	[11]
Единичный слой	Методы вычислительной гидродинамики, Flow-3D	Анализ геометрии и дефектности печатного слоя в зависимости от режимов печати и характеристик смеси	Есть	[12]
Много-слойная печать	Теория функционала плотности (DFT)	Прогнозирование прочности сцепления слоев в зависимости от характеристик смеси	Есть	[13]
Модельная конструкция	Метод конечных разностей (МКР, англ. FDM); FLAC 3D	Прогнозирование пластического разрушения и устойчивости 3D-печатных конструкций с использованием критерия пригодности для строительства свойств смеси	Есть	[14]
Конструкции вариативной геометрии	Трехмерная нелинейная квазистатическая конечно-элементная модель; Python, MATLAB, ABAQUS	Прогнозирование разрушения 3D-печатных структур в зависимости от свойств смеси	Есть	[15]
Стеновая конструкция	Метод конечных элементов (МКЭ, англ. FEM); ABAQUS	Прогнозирование механического поведения, пластического разрушения, разрушения при упругом смятии 3D-печатных структур в зависимости от свойств смеси	Есть	[16,17]

Продолжение таблицы 1.2

Масштаб моделирования	Метод и программный комплекс	Описание	Экспериментальная верификация	Источник
Конструкции вариативной геометрии	Метод конечных элементов; Rhinoceros 3D, Python	Использованы две стратегии МКЭ для разработки численных моделей прогнозирования устойчивости печатных конструкций, с учетом зависящих от времени свойств смеси	Есть	[18]
Конструкции вариативной геометрии	Метод конечных элементов; MATLAB (PDE toolbox)	Прогнозирование механического поведения и устойчивости печатных элементов в зависимости от их геометрии	Нет	[19]
Модельный прямой элемент	Конечно-элементный анализ с цифровой корреляцией изображений (DIC, FEM)	Прогнозирование максимального количества слоев, которые могут быть нанесены до разрушения конструкции в зависимости от изменения во времени свойств смеси	Есть	[20]

Здесь дается численный прогноз результирующих ширины, высоты и деформатности слоя в зависимости от реологии смеси и скорости печати. Это создает основу для оценки геометрической точности печатаемого объекта. На стадии многослойной печати моделируется процесс укладки нескольких слоев, адгезия между ними. Анализируется оценка прочности межслойного сцепления, прогнозирование образования «холодных швов» и их влияние на целостность конструкции.

На стадии анализа структурного и механического поведения в процессе печати моделируется поведение всей растущей конструкции под действием собственного веса и веса наносимых слоев. Анализируется устойчивость, риски пластического разрушения или смятия до завершения печати. Моделируются как простые стены, так и конструкции сложной вариативной геометрии.

В моделировании учитываются следующие параметры смесей и процесса печати:

- параметры смеси: плотность (ρ), модуль сдвига (g), динамический предел текучести (τ_0), вязкость смеси (η) или параметры моделей Бингама/Шведова-Бингама;

- параметры технологического процесса: скорость печати (v), геометрия сопла (d), расстояние между соплом и предыдущим слоем (h), скорость подачи материала (v), относительная скорость подачи материала (v/v), скорость вращения шнека ($v_{\text{ш}}$), временной интервал между укладкой слоев (τ).

Таким образом, современные методы численного моделирования (CFD, МКЭ, МДЭ) позволяют с разной степенью детализации имитировать все ключевые технологические стадии 3D-печати, от экструзии до поведения целой конструкции. Однако применение разработанных численных моделей для непосредственного управления процессом в реальном времени имеет ряд существенных ограничений, к которым можно отнести следующее:

1. Непрактичность входных параметров. Модели оперируют фундаментальными реологическими характеристиками (предел текучести τ_0 , модуль сдвига G , вязкость η). Для их оценки требуется сложное и дорогое лабораторное оборудование, оператор не может в реальном времени измерить предел текучести для корректировки скорости печати. При этом существуют заметные разночтения в том, какие параметры материала использовать в качестве входных параметров математических моделей; параметры смеси задаются линейно, в то время как реальные реологические параметры меняются нелинейно. Все это приводит к тому, что невозможно оперативно измерить и контролировать характеристики смеси на строительной площадке.

2. Разрыв в адаптивности моделей. Существующие решения хорошо применимы преимущественно для простых геометрий (стены, колонны), что делает их численные прогнозы для сложных, нерегулярных архитектурных форм ненадежными. Кроме того, большинство ПК не имеют встроенных средств для адекватного учета нелинейной эволюции механических свойств материала в ходе печати, требуя сложных сторонних программных надстроек или собственных разработок. Также большинство моделей плохо масштабируются для сложной геометрии и требуют нереалистично точного знания эволюции свойств материала во времени.

1.2.2 Анализ методов и подходов к управлению процессом 3D-печати на технологической стадии

Технологическая стадия представляет собой ключевой физический этап преобразования цифровой модели (двойника) в материальный объект. В ряде исследований [21-28] установлено, что эффективное регулирование, управление и, в целом, качество прохождения данного этапа зависят от взаимосвязи между технологическими свойствами бетонной смеси и режимами печати.

Меччерине и др. в работе [29] обсудили характеристики 3D-печатных объектов в процессе затвердевания и в уже затвердевшем состоянии. Авторы подчеркнули, что необходимо оценивать следующие ключевые свойства: физические (например, плотность), механические (например, прочность на сжатие и растяжение, а также модуль упругости), эксплуатационные (например, устойчивость к хлоридам и карбонизации) и свойства, связанные с усадкой/ползучестью. Что же касается свежего состояния, то одним из наиболее важных свойств 3D-печати является ее способность поддерживать последовательное нанесение слоёв, называемое наращиваемостью, которая напрямую связана с максимальной высотой печати [30]. Это свойство преимущественно определяется реологией материала, в частности, пределом текучести, как во время печати (обеспечивая правильное нанесение слоёв), так и с течением времени (учитывая структурирование, которое облегчает нанесение последующих слоёв). Все это делает актуальным практический интерес к прогнозированию наращиваемости материала до начала печати.

Чжан и др. в своих трудах [31] предложили эффективный метод мониторинга в сочетании с системой обратной связи (с компьютерным зрением и последовательной связью) для контроля качества 3D-печати в режиме реального времени. Для этого рядом с соплом добавлялась присадка-ускоритель для контроля реологии. Харбуз и др. [32] провели оценку четырех смесей для 3D-печати в ходе процесса реологических измерений, а именно при «восходящем и нисходящем» течении (измерение параметров петли гистерезиса),

статическом пределе текучести при испытаниях на рост напряжений, вязкоупругих измерениях при малоамплитудном колебательном сдвиге и реальных испытаниях 3D-печати. Авторы пришли к выводу, что хорошо известного параметра A_{thix} (A_{thix} - скорость структурообразования материала в покое. Он показывает, как быстро восстанавливается внутренняя структура и возрастает напряжение сдвига (предел текучести) материала после прекращения воздействия сдвиговых нагрузок) недостаточно для эффективной оценки тиксотропного поведения материала, поскольку он связан со структурированием во время покоя, в то время как поведение во время преобладающих сдвиговых деформаций лучше характеризуется предложенным авторами новым индексом тиксотропии.

Несмотря на имеющиеся разночтения в подходах, однозначно установлено, что на качество 3D-печатных композитов и конструкций наиболее значительно влияют четыре основных параметра:

- 1) скорость печати (printing speed) [33-40];
- 2) расстояние между соплом и слоем (nozzle gap distance) [41-46];
- 3) скорость подачи материала (feed rate of the material) [47-51];
- 4) время между укладкой слоев (time gap) [51-56].

Расшифруем подробнее указанные параметры:

1. *Влияние скорости печати.* Увеличение скорости 3D-печати снижает прочность на сжатие и прочность межслойных связей, поскольку при этом уменьшается ширина печатного слоя и могут возникать микропустоты. В работах [57, 58] однозначно установлено, что скорость печати не должна превышать 50-70 мм/с. При использовании более пластичных смесей допустима более высокая скорость, тогда как печать малоподвижными смесями на повышенных скоростях ведёт к уменьшению сечения слоя и появлению микропустот на границе раздела, что негативно сказывается на механических свойствах композита. Скорость печати в первую очередь определяется характеристиками смеси, поэтому необходимы постоянный контроль её состояния и ручная корректировка процесса оператором.

2. Расстояние между соплом и слоем. Расстояние, превышающее 2 см, приводит к снижению прочности сцепления слоёв. Чем меньше этот зазор, тем выше прочность печатного композита и качество результата печати в целом. При этом расстояние должно оставаться фиксированным на протяжении всего процесса печати [59-64]. В ходе печати слои могут деформироваться и расстояние отклоняться от заданного, поэтому рекомендуется оснащать печатающую головку отдельным датчиком [65], который определяет фактическое расстояние и корректирует положение сопла для поддержания его постоянного значения. В настоящее время данный параметр, как правило, в процессе печати автоматически не регулируется, хотя его стабилизация весьма способствует улучшению качества поверхности изделий.

3. Скорость подачи материала. Скорость подачи существенно влияет на результирующее качество 3D-печати. При недостаточной скорости экструзии на поверхности образуются дефекты, снижающие долговечность конструкции, а при избыточной - возникают наплывы и увеличивается расход смеси. В современных ПК используются алгоритмы расчёта объёма материала, однако из-за непрерывного изменения свойств смеси они не могут обеспечить высокой точности прогноза необходимой скорости подачи материала. Для компенсации применяются специальные корректирующие коэффициенты, позволяющие изменять скорость подачи материала в реальном времени. Это, в свою очередь, создаёт ряд сложностей, требующих сложной автоматизации и синхронизации всех процессов, поскольку в большинстве комплексов регулирование параметров экструзии до сих пор осуществляется оператором вручную, исходя из текущих условий и свойств смеси.

4. Время между укладкой слоёв. Увеличение временного разрыва (time gap) между укладкой слоёв однозначно приводит к снижению не только прочности сцепления, но и прочности на сжатие, изгиб и растяжение слоистых 3D-печатных композитов и изделий из них. В исследованиях [65-69] строго показано, как по мере роста временного интервала меняется характер разрушения: по поверхности сцепления слоёв активно развиваются микротрещины. В результате

прочность слоистых композитов по сравнению с литыми снижается пропорционально длительности паузы. Кроме того, адгезия слоёв и, как следствие, прочностные характеристики композита зависят от скорости схватывания материала и скорости его обезвоживания [70-74]. Увеличение временного промежутка закономерно ослабляет сцепление и снижает прочность слоистого композита. Критическим считается интервал 20-30 мин, превышение которого вызывает падение прочности при сжатии до 40-50%, а при изгибе - до 40-60% по сравнению с прочностью композита (изделия), сформированного без существенного увеличения временных задержек.

Анализ научно-технической литературы показывает, что ключевым для качества конечного объекта является этап безопалубочной послойной укладки. Его успех определяется точным соответствием между динамическим физическим процессом печати и статической CAD-моделью. Однако это соответствие нарушается из-за непрерывного изменения реологических и, соответственно, технологических свойств бетонной смеси во времени, а также из-за технологических погрешностей оборудования. Из-за этого существует проблема необходимости внедрения механизмов и алгоритмов оперативного контроля свойств смеси на строительной площадке. Без оперативного контроля становится затруднительным эффективно регулировать процесс 3D-печати, поскольку оператор физически не может адекватно корректировать параметры процесса печати при изменении свойств смеси.

Проведенный анализ выявил существенный разрыв между методами и подходами к управлению проектной и технологической стадиями производственного цикла строительной 3D-печати, а именно, между развитием инструментов моделирования процесса и системами по его оперативному управлению. Главной проблемой является не недостаток сложных моделей, а отсутствие замкнутых контуров управления (cyber-physical systems).

Таким образом можно сделать вывод о том, что в настоящее время еще не сформированы комплексные подходы, методы и технические решения по управлению всем циклом строительной 3D-печати. Каждая стадия процесса

моделируется и управляется по отдельности. Необходим переход от открытого процесса, управляемого оператором по интуиции и на основе примерных прикидок, к эффективной автоматизированной системе.

1.3 Разработка факторов и способов управления технологическим процессом строительной 3D-печати

Факторы и параметры такого управления базируются на анализе баланса сил, действующих в технологическом процессе 3D-печати. Данный баланс сил определяется внешними воздействиями в процессе транспортировки, экструзии и послойной укладки и внутренними силами, определяющими агрегативную устойчивость и реологическое поведение бетонной смеси как вязко-пластичной дисперсной системы. По типу реологического поведения готовая к употреблению смесь для 3D-печати относится к вязко-пластичным системам, которые меняют свои свойства от псевдотвердого состояния до жидкого, а именно: начинают течь после преодоления предела текучести, а их вязкость зависит от скорости и напряжения сдвига (рисунок 1.1). Вклад каждой из составляющих баланса сил зависит от динамики внешних воздействий. В процессе 3D-печати смесь после приготовления при перекачке и экструзии находится в динамических условиях действия сдвиговых напряжений различной интенсивности, в процессе укладки слоев в условиях нарастающего действия статических сжимающих напряжений.

На стадии перекачивания процесс определяется следующими силами: гидравлической F_h , тяжести F_g , внутреннего трения F_f , инерции потока F_i , местных сопротивлений F_L и F_Z . При этом смесь проявляет свойства ньютоновской жидкости (рисунок 1.2). Для обеспечения течения смеси при перекачивании необходимо выполнение следующего условия:

$$F_h > F_f + F_i \quad (1.1)$$

На смесь действуют максимальные для всего технологического процесса сдвиговые напряжения, смесь проявляет свойства ньютоновской жидкости с минимальной вязкостью, определяемой максимально разрушенными контактами в ее структуре как дисперсной системы (участок I реологической кривой).

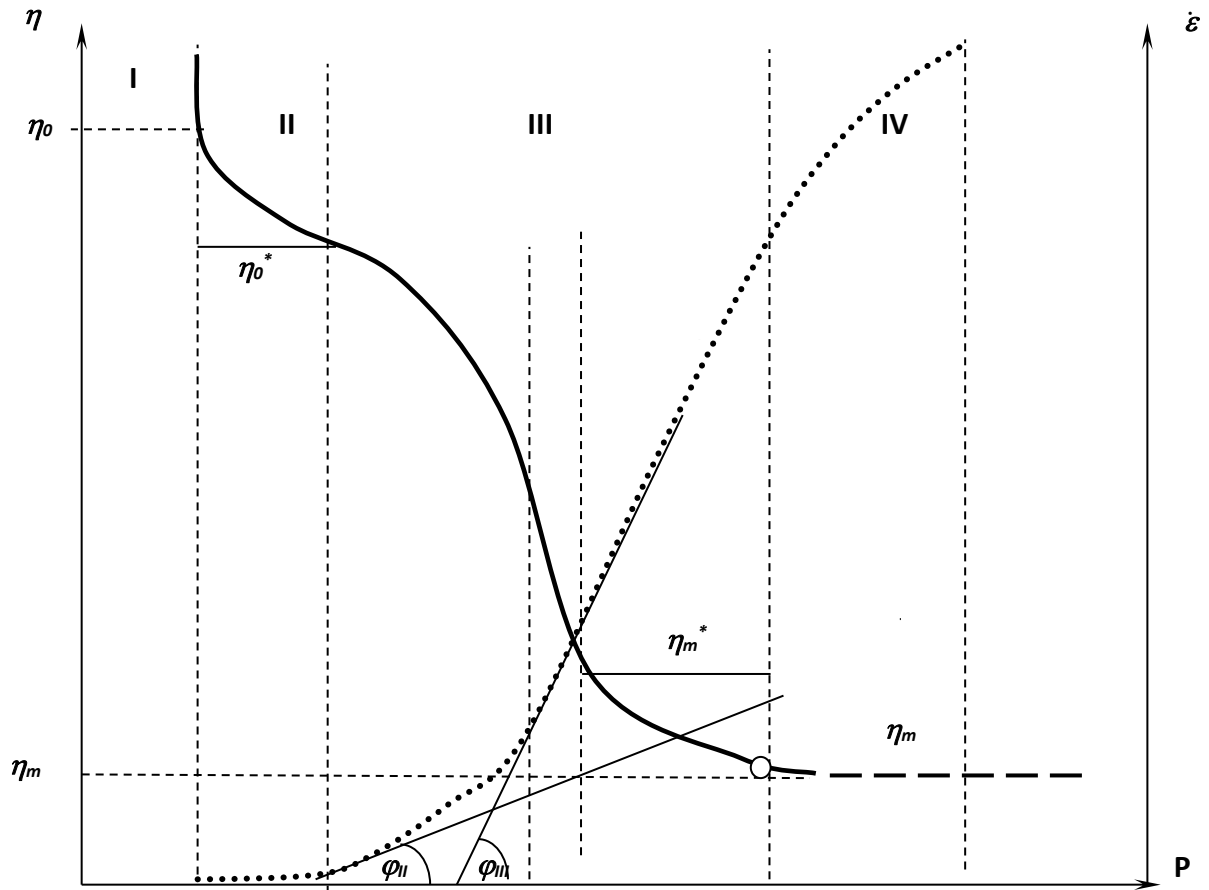


Рисунок 1.1 – Полная реологическая кривая течения дисперсных систем по П. А. Ребиндеру [75]

Обозначено: *Участок I* - дисперсная система ведет себя как твердообразное тело с неразрушенной структурой (модель Кельвина), где $\eta \rightarrow \infty$, η_0 - максимальная вязкость, τ_{k1} - напряжение сдвига.

Участок II - вязко-пластическое течение дисперсной системы с неразрушенной структурой (модель Шведова), где η_0^* - ползучесть, τ_k - напряжение сдвига.

Участок III - вязко-пластическое течение дисперсной системы с энергично разрушаемой структурой (модель Бингама), η_m^* - эффективная вязкость, τ_m - минимальное напряжение сдвига, τ_{k2} - напряжение сдвига.

Участок IV - ламинарное течение дисперсной системы с разрушенной структурой. На данном участке η_m - наименьшая вязкость, τ_m - минимальное напряжение сдвига, отвечающее полностью разрушенной структуре.

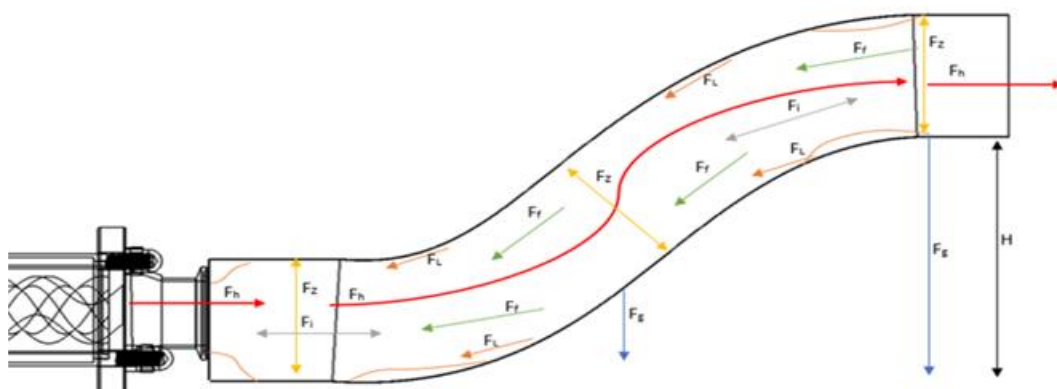


Рисунок 1.2 – Схема распределения сил в потоке смеси на стадии транспортирования в процессе 3D-печати

На стадии экструзии процесс определяется следующими силами: сдвига $F_{сдв}$, гидравлической F_h , сжатия $F_{сж}$, тяжести F_g , внутреннего трения F_f , инерции потока F_i , местных сопротивлений F_L и F_Z , вязкого сопротивления $F_{вяз}$ (рисунок 1.3).

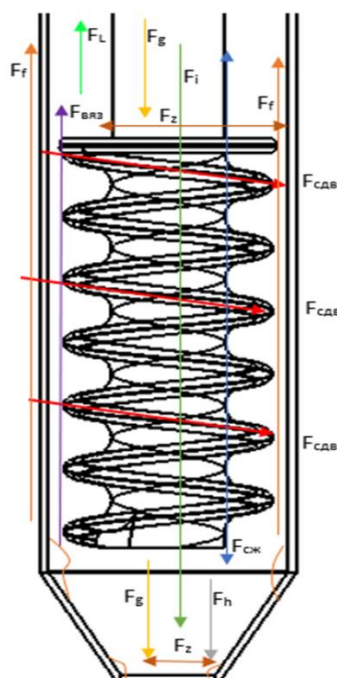


Рисунок 1.3 – Схема распределения сил при экструзии смеси в процессе 3D-печати

Для обеспечения течения смеси при экструзии необходимо выполнение условия:

$$\pm F_{\text{сдв}} + F_f > F_{\text{сж}} + F_{\text{вяз}} + F_i + F_g \quad (1.2)$$

На смесь действуют сдвиговые напряжения средней интенсивности, смесь проявляет свойства вязко-пластической жидкости с переменной вязкостью (участок II реологической кривой), величина которой зависит от степени восстановления контактов в структуре дисперсной системы.

На стадии послойной укладки устойчивость печатных объектов определяется статическими силами от нарастающего веса вышележащих слоев F_g и силой сопротивления структуры смеси $F_{\text{соп}}$ (рисунок 1.4).

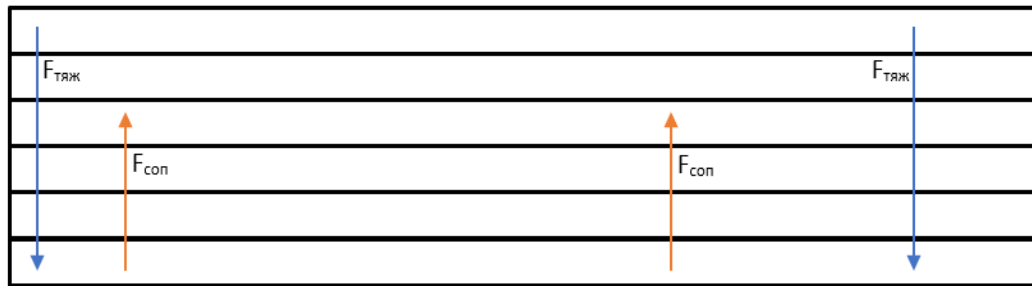


Рисунок 1.4 – Распределение сил в системе напечатанных слоев

Для обеспечения геометрического соответствия и устойчивости напечатанного объекта необходимо выполнение условия:

$$F_{\text{соп}} > F_{\text{тяж}} \quad (1.3)$$

В процессе укладки единичного слоя на смесь действуют минимальные сдвиговые напряжения, смесь переходит в состояние восстановления контактов в дисперсной системе и проявляет свойства пластичности с максимальной постоянной вязкостью (участок III реологической кривой). После укладки перестают действовать сдвиговые напряжения, смесь проявляет свойства псевдотвердого тела (участок IV реологической кривой).

На основании проведенного анализа баланса сил предложены параметры и способы регулирования процессов 3D-печати на всех ее технологических стадиях (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Параметры и способы регулирования процессов 3D-печати

Силы, действующие на систему		Параметры регулирования	Способы регулирования	Регулируемые реологические характеристики смесей
Система подачи				
Внешние	$F_h = AP$ F _h - гидравлическая сила	P - давление в трубопроводе, Па	Скорость вращения шнека, скорость движения системы перемещения	η _м - динамическая вязкость, τ _м - динамический предел текучести
	$F_g = mg$ F _g - сила тяжести	m - масса подаваемой смеси, кг		
Внутренние	$F_f = \lambda \rho A \frac{\hat{v}^2}{2}$ F _f - сила трения	v - скорость перемещения бетонной смеси в трубопроводе, м/с		
	$F_i = ma$ F _i - инерционная сила	m - масса смеси, а - ускорение смеси		
Система экструзии				
Внешние	$F_h = AP$ F _h - гидравлическая сила	P - давление в трубопроводе, Па	Скорость вращения шнека, скорость движения системы перемещения	η _м - эффективная Бигмановская вязкость η [*] ₀ - пластическая вязкость τ _{K2} - предел текучести (по Бингаму) τ _к - предел ползучести (по Шведову)
	$F_g = mg$ F _g - сила тяжести	m - масса смеси		
	$F_{сдв} = GA$ F _{сдв} - сдвиговая сила	G - сдвиговое напряжение		
Внутренние	$F_f = \lambda \rho A \frac{\hat{v}^2}{2}$ F _f - сила трения	v - скорость перемещения бетонной смеси в трубопроводе, м/с		
	$F_i = ma$ F _i - инерционная сила	m - масса смеси, а - ускорение смеси		
Система укладки				
Внешние	$F_g = mg$ F _g - сила тяжести	m - масса материала	Скорость вращения шнека, скорость движения системы перемещения, время печати одного слоя	η _м - статическая вязкость τ _м - статический предел текучести и пластическая прочность
Внутренние	$F_{соп} = S\sigma$ F _{соп} - сила сопротивления материала	S - площадь поперечного сечения, σ - напряжение сопротивления материала деформации		

Разработка методов и способов управления процессом 3D-печати базируется на учете взаимосвязи между параметрами процесса печати и изменением реологического поведения смесей на всех его стадиях.

1. Для стадии транспортировки смеси, когда ее поведение является течением псевдоньютоновской жидкости при действии постоянных высоких напряжений сдвига, основными объектами регулирования являются гидравлическая сила F_h , сила тяжести F_g , сила трения F_f , инерционная сила F_i . Основные способы управления - регулирование скорости и давления в системе подачи.

2. Для стадии экструзии, когда поведение смеси реализуется как вязкопластическое течение при действии низких сдвиговых напряжений, основными объектами регулирования являются гидравлическая сила F_h , сила тяжести F_g , сдвиговая сила $F_{сдв}$, сила трения F_f , инерционная сила F_i . Основными способами управления являются следующие параметры процесса - скорость вращения шнека, скорость движения системы экструзии, коэффициент экструзии.

3. Для стадии послойной укладки слоев, когда в отсутствие сдвиговых напряжений происходит переход смеси в твердообразное состояние при действии нарастающих сжимающих напряжений, основными объектами регулирования являются сила тяжести F_g , сила сопротивления материала $F_{соп}$. Основными способами регулирования данных параметров являются ширина слоя, скорость движения системы перемещения, время прохождения одного слоя, количество слоев.

В таблице 1.4 представлен перечень параметров процесса 3D-печати критерияльных для его управления, и соответствующих реологических характеристик смесей, подлежащих обеспечению и контролю. Ключевыми показателями качества напечатанных строительных объектов (см. разд. 1.1) являются отсутствие дефектов единичного печатного слоя, точность геометрии и устойчивость объекта в целом. Исходя из этого, ключевыми для управления процессом 3D-печати являются стадии экструзии и послойной укладки. При этом существенное значение имеет система подачи, в которой необходимо обеспечить максимальные внешние воздействия на смесь для разрушения структуры смеси и обеспечения ее течения.

Таблица 1.4 – Взаимосвязь параметров регулирования режимов 3D-печати с характеристиками смеси

Процессы	Параметры процесса	Характеристики смеси
Экструдирование	$v_{\text{экстр}}$ скорость экструзии, $H_{\text{слоя}}$ ширина слоя, $k_{\text{экстр}}$ коэффициент экструзии, $v_{\text{перем}}$ скорость печати	$\tau_{\text{бигм}}$ эффективная Бингмановская вязкость, $\eta^{\text{эф}}$ Пластическая вязкость
Укладка слоев	$v_{\text{перем}}$ скорость печати, $h_{\text{слоя}}$ высота слоя, $H_{\text{слоя}}$ ширина слоя, $v_{\text{перем}}$ скорость печати, Δt время печати одного слоя	τ_0 статический предел текучести и пластическая прочность, η_{max} статическая вязкость

В исследованиях для обоснования требований к значениям реологических характеристик смесей, критериальных для процесса 3D-печати, планируется использовать метод классической сдвиговой реометрии. Одновременно предполагается разработать метод и инструмент оперативного контроля технологических свойств смеси, ключевыми из которых являются:

1) экструдированность (extrudability) - характеризует способность смеси проходить через сопло без значительной деформации поперечного сечения и формировать бездефектный слой,

2) формоустойчивость (shape retention, buildability) - характеризует способность слоя материала сохранять свою геометрию (форму и размер), а также способность напечатанного объекта сохранять устойчивость при длительных и возрастающих нагрузках.

Планируется установить статистически достоверную корреляцию между реологическими и технологическими параметрами смеси, а также экспериментально-статистические зависимости для законов их изменения во времени. На этой основе будут разработаны методы и инструменты контроля, сформулированы требования к критериальным показателям свойств смесей, определяющим их технологическую пригодность для экструзионной строительной 3D-печати. Будет определён эффективный диапазон реологических и технологических параметров, обеспечивающих приемлемое качество экструзионных слоёв и устойчивость объекта в процессе печати, что позволит сформулировать и обосновать

набор входных данных для управления всем процессом.

Для обоснования методов и способов управления печатью предполагается применить численное моделирование с использованием современных CFD-систем (ANSYS Fluent), что позволит качественно прогнозировать геометрическое соответствие и устойчивость печатной структуры заданной геометрии в зависимости от реологических характеристик смеси и технологических параметров. В модели будут заложены экспериментально определяемые реологические характеристики, это даст возможность оперативно регулировать параметры процесса при изменении свойств смеси и тем самым обеспечивать требуемые геометрию и устойчивость печатного объекта. Результаты моделирования планируется верифицировать экспериментально, после чего будут уточнены количественные зависимости между технологическими параметрами печати, свойствами смеси и устойчивостью 3D-печатных структур.

1.4 Цель, задачи и блок-схема исследования

Цель диссертационного исследования заключается в совершенствовании методов создания строительных изделий посредством аддитивных технологий (3D-печати) на основе моделирования и контроля технологического процесса.

Теоретический анализ технологических стадий производственного цикла строительной 3D-печати позволил обосновать факторы и методы регулирования ее режимов строительной 3D-печати (см. табл.1.3), а также выявить взаимосвязь параметров регулирования режимов 3D-печати с характеристиками смеси (см. табл.1.4).

Блок-схема исследований представлена на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Блок-схема экспериментальных исследований

В соответствии с теоретическими подходами сформулированы следующие задачи экспериментальных исследований.

1. Разработка методики, обоснование факторного пространства и средств исследований.
2. Исследование взаимосвязи качества модельных строительных конструкций с реологическими и технологическими свойствами цементных смесей и обоснование требований к их значениям.
3. Численное моделирование процесса 3D-печати и экспериментальная верификация его результатов.
4. Обоснование требований к технологическим режимам 3D-печати, определяемых на основе численного моделирования и экспериментальных исследований.
5. Разработка комплексной системы контроля и регулирования производственного цикла 3D-печати и практических предложений по ее использованию.

1.5 Выводы по главе 1

1. На основании анализа опыта применения аддитивных технологий (3D-печати) в строительстве выявлено, что одной из существенно значимых причин проблемы качества 3D-печатных строительных объектов является то, что не сформированы комплексные подходы, методы и технические решения по управлению всем циклом строительной 3D-печати. Имеется существенный разрыв между проектной и технологической стадией процесса. Современные методы численного моделирования (CFD, МКЭ, МДЭ) позволяют с разной степенью детализации имитировать все ключевые технологические стадии 3D-печати, от экструзии до поведения целой конструкции. Однако, инструментарий для оперативного управления технологическим процессом на этой основе не развит.

2. Общая системная проблема заключается в отсутствии методов и способов непрерывного управления процессом строительной 3D-печати. Каждая стадия процесса управляется по отдельности оператором процесса вручную.

Необходим переход от открытого процесса, управляемого оператором по интуиции, к автоматизированной системе, отказ от «человеческого фактора». Это требует решения комплекса задач: от точного прогнозирования поведения материала до разработки систем контроля качества печати, геометрического соответствия, чтобы физический объект отвечал расчетным характеристикам и параметрам модели.

3. Целью диссертационной работы является совершенствование методов создания строительных изделий посредством аддитивных технологий (3D-печати) на основе моделирования и контроля технологического процесса.

4. Концепция исследования заключается в создании единого цикла управления процессом 3D-печати, включая моделирование устойчивости 3D-печатных структур на проектной стадии, методы контроля и регулирования процесса на технологической стадии. На проектной стадии прогнозирование обеспечения геометрического соответствия и устойчивости 3D-печатной структуры заданной геометрии будет основано на численном моделировании в расчетном CFD-комплексе (ANSYS Fluent), реализующем методы вычислительной гидродинамики. Требования к способам и условиям регулирования режимов печати на технологической стадии будут основаны на анализе баланса сил в процессе транспортировки, экструзии и послойной укладки. Комплекс решений по управлению производственным циклом 3D-печати будет опираться на экспериментально установленные количественные взаимосвязи между параметрами режимов печати и изменением реологического поведения смесей при их варьировании.

2 МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследования - процесс строительной 3D-печати, включая моделирование, технологические режимы экструзии и послойной укладки.

Предмет исследования - методы, средства моделирования, контроля и управления процессом строительной 3D-печати, основанные на взаимосвязи между варьируемыми параметрами процесса, реологическими и технологическими свойствами смесей.

Экспериментальные исследования включали 3 этапа.

1. Определение исходных граничных значений параметров процесса печати в зависимости от реологических характеристик смеси.
2. Обоснование комплексного критерия оценки технологичности готовой к употреблению смеси для 3D-печати и определение требований к его значениям.
3. Обоснование требований к методам управления и контроля технологическим процессом 3D-печати на основании взаимосвязи между реологическими, технологическими свойствами смесей для 3D-печати и параметрами процесса.

Промышленная апробация была направлена на верификацию результатов экспериментальных исследований по управлению и контролю процессом 3D-печати.

2.1 Характеристика материалов

В качестве компонентов для приготовления смесей применялись следующие материалы.

Портландцемент (Ц) производства ЗАО «Подгоренский цементный завод» ЦЕМ I 42,5Н, соответствующий требованиям ГОСТ 31108-2020 [76]. Нормальная густота цементного теста 24,8%, сроки схватывания цемента: начало не ранее - 2 ч 20 мин, не позднее - 3 ч 15 мин, удельная поверхность находилась в пределах 382 м²/кг.

В качестве заполнителя использовался **песок кварцевый (П)** Семилукского месторождения, промышленный, обогащённый, соответствующий требованиям ГОСТ 8736-2014 [77].

Песок перед приготовлением смеси высушивался при 100 ± 5 °С.

В качестве микронаполнителя использовалась **известняковая мука (ИМ)** производства ООО «ВЗМП», соответствующая требованиям ГОСТ 26826-86 [78].

В качестве модификаторов вязкости и пластифицирования цементных смесей были использованы следующие добавки:

- **метакаолин (МКЛ)** марки ВМК-45 (ТУ 23.99.19-004-34556001-2017) производства ООО «ВЗМП»,

- **пластификатор (СП)** на основе поликарбоксилатных эфиров (ФлейкАктив-160) (ТУ 20.16.53-003-46530720-2025), выбор обусловлен тем, что пластификаторы на основе поликарбоксилатных эфиров показали наибольшую эффективность при регулировании свойств смесей для 3D-печати.

Вода для бетонов и строительных растворов, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия» [79].

Исследования выполнялись на двух типах смесей - модельных (таблица 2.1) и готовых к употреблению (таблица 2.2). При приготовлении модельных смесей соблюдалось постоянство их консистенции (соответствующей нормальной густоте цементного теста) путем регулирования водо-цементного соотношения (В/Ц), а изменение реологического поведения обеспечивалось путем введения суперпластификатора (СП) и модификатора вязкости (МКЛ). Применяемые в исследованиях готовые к употреблению составы смесей оптимизированы и запатентованы на основании предыдущих исследований, опубликованных в работах [80-84]. В составах соблюдалось постоянство вида и дозировок суперпластификатора и модификатора вязкости. Отличие между смесями заключалось в типе и гранулометрии наполнителя (песок $d_4 = 0,16-1,2$ мм; известняковая мука $d_4 = 0,1-55$ мкм), массовом соотношении

вяжущего и наполнителя, принимаемых в качестве ключевых факторов изменения вязкопластических свойств смеси.

Таблица 2.1 – Характеристика составов модельных смесей

Обозначение смеси	В/Ц	Дозировка добавок, % от массы цемента	
		Метакаолин	Пластификатор
Цемент + вода (Ц - В);	0,28	-	-
Цемент + вода + суперпластификатор (Ц - В - СП)	0,26	-	1,2
Цемент + вода + суперпластификатор-метакаолин (Ц - В - СП - МКЛ)	0,26	2	1,2

Таблица 2.2 – Характеристика составов готовых к употреблению смесей для 3D-печати

Обозначение смеси	МКЛ, % от массы Ц	В/Ц	СП, % от массы Ц	Дозировка песка, соотношение по массе Ц: П	Дозировка наполнителя (ИМ), % от массы Ц
Мелкозернистая, патент RU 2729085 C1 (Ц - В - СП - МКЛ - П)	2	0,31	0,4	1:1,25	-
Микрозернистая, патент RU 2729283 C1 (Ц - В - СП - МКЛ - ИМ)	2	0,47	0,4	-	100

2.2 Этапы эксперимента и факторное пространство исследований

На первом этапе эксперимента проводилось определение исходных граничных значений параметров процесса печати в зависимости от реологических характеристик смеси.

Задачи данного этапа формулируются следующим образом:

1) определение взаимосвязи между моделью реологического поведения, значениям реологических характеристик смесей, режимами процесса 3D-печати и качеством модельных печатных объектов;

2) установление граничных значений реологических характеристик смеси, обеспечивающих качество и устойчивость 3D-печатных объектов, как входных данных для моделирования;

3) установление требований к диапазону варьирования параметров технологического процесса 3D-печати в зависимости от реологических характеристик смесей.

Был выполнен следующий комплекс исследований (таблица 2.3).

1. Экспериментальные исследования реологического поведения модельных (см. табл. 2.1) и готовых к употреблению смесей (см. табл. 2.2) методами сдвиговой и сдвигающей реометрии (метод Rousell'я [3]) и установление взаимосвязи между реологическим поведением при сдвиге и сдавливании с постоянной скоростью деформирования.

2. Экспериментальные исследования условий обеспечения устойчивости модельных элементов на специально разработанном лабораторном прототипе строительного 3D-принтера при использовании модельных смесей (см. табл. 2.1).

3. Численное моделирование процесса 3D-печати и верификация его результатов при печати модельных элементов на лабораторном 3D-принтере. Реализация численного эксперимента проводилось в программном комплексе ANSYS Fluent версии R2023.1 при однослойной и многослойной печати с оценкой качества экструзионного слоя. Исследования проводились на готовых к употреблению смесях (см. табл. 2.2).

Таблица 2.3 – Матрица первого этапа эксперимента

Вид исследования	Объект исследования	Варьируемые факторы	Метод и средства исследований (контроля)	Контролируемые параметры
Изучение реологического поведения	Модельные цементные смеси: Ц-В; Ц-В-СП; Ц-В-СП-МКЛ	В/Ц-отношение, вид добавок-модификаторов	Сдвиговая реометрия, ротационный реометр «RHEOTEST 4.1»	Статическая вязкость, η_0 ; динамическая вязкость, η ; эффективная вязкость, η^* ; статический предел текучести, τ_{k1} ; предел текучести τ_{k2} (по Бингаму)
	Готовые к употреблению смеси: мелкозернистая, патент RU 2729085 C1; микрозернистая, патент RU 2729283 C1	Вид наполнителя		
	Модельная цементная смесь Ц-В-СП-МКЛ Готовые к употреблению смеси: мелкозернистая, патент RU 2729085 C1; микрозернистая, патент RU 2729283 C1	Вид наполнителя	Сдавливающая реометрия (метод Roussell'я [3]), испытательная система INSTRON 5982	Оценка предела пластичности. (при сдавливании), $K_i(I)$.
Изучение условий устойчивости модельных элементов в процессе 3D-печати	Модельный элемент 40 × 300 × 400 мм	<u>Вид смеси:</u> Ц-В; Ц-В-СП; Ц-В-СП-МКЛ <u>Режимы печати:</u> скорость вращения шнека $V_{\text{шн}} = 35$ об/мин, скорость печати $V = 400$ мм/с	Лабораторный 3D-принтер. Фотофиксация, визуальный контроль	Устойчивость объекта, геометрия слоя, сплошность слоя
Численное моделирование и верификация	Прямолинейный однослойный элемент: 1) круглый 20 × 300 мм; 2) прямоугольный 45 × 15 × 300 мм	<u>Параметры модели Хершеля-Балкли:</u> предел текучести τ_0 , коэффициент вязкости K , индекс степенного закона n <u>Параметры процесса печати:</u> скорость подачи материала U , скорость печати $V = 700$ мм/с, скорость вращения шнека $V_{\text{шн}} = 35$ об/мин, круглое сопло $d = 20$ мм, прямоугольное 25 × 40 мм	ПК ANSYS Fluent версии R2023.1. Лабораторный 3D-принтер. Фотофиксация, визуальный контроль	Профили поперечных сечений слоя: высота и ширина сечения, форма боковых поверхностей, общая геометрия поперечного сечения
	Прямолинейный многослойный элемент - 4 слоя сечением 45 × 15 мм, длина 300 мм			

На втором этапе эксперимента проводилось определение требований к технологическим характеристикам смеси, обеспечивающим заданное качество 3D-печатных объектов.

Был выполнен комплекс следующих исследований (таблица 2.5):

- 1) разработка и апробация прибора для оперативного контроля технологичности смеси для 3D-печати;
- 2) определение требований к значениям пластической прочности готовой к употреблению смеси для 3D-печати как комплексному критерию оценки технологичности смеси.

При разработке прибора на базе метода П.А Ребиндера в качестве аналога принят пластометр конструкции МГУ. Метод измерения пластической прочности на коническом пластометре основан на определении нагрузки, необходимой для погружения металлического конуса с заданным углом при вершине в исследуемую массу на фиксируемую глубину.

Апробация прибора осуществлялась при контроле качества смесей в диапазоне температуры смеси 5-30 °С в период 0,5-30 мин после приготовления.

Верификация прибора контроля производилась путем сравнения данных контроля пластичности авторским прибором с результатами оценки при помощи стандартного грунтового пенетрометра Georocket S068, который предложен к нормированию в рамках НИОКР: «Исследование и комплексная оценка технических свойств смесей и композитов для аддитивных строительных технологий (3D-печати)» (Договор № 32312234196 - 1/2023 с ФАУ ФЦС) (2023 г.).

При определении требований к параметрам контроля и диапазону регулирования технологических характеристик смесей для 3D-печати изучалось (таблица 2.4):

- влияние значений пластической прочности на качество экструзионного слоя и устойчивость модельных печатных объектов;

Таблица 2.4 – Матрица второго этапа эксперимента

Вид исследования	Объект исследования	Варьируемые факторы	Метод и средства исследований (контроля)	Контролируемые параметры
Апробация прибора для оперативного контроля технологичности смеси	Готовые к употреблению смеси: мелкозернистая, патент RU 2729085 C1; микрозернистая, патент RU 2729283 C1	Состав смеси; Вид наполнителя; Температура смеси; Время выдержки смеси	Пластометр авторской конструкции; Грунтовый пенетромтр Geopocket S068	Пластическая прочность, $R_{пл}$
Изучение влияния пластической прочности смеси на качество печатных объектов	Прямолинейный элемент 40 × 300 × 160 мм	Консистенция готовой к употреблению смеси мелкозернистой смеси (В/Ц)	Лабораторный 3D-принтер; Фотофиксация, визуальный и измерительный контроль	Устойчивость объекта, геометрия слоя, сплошность слоя, относительные продольные и поперечные деформации слоя
Изучение влияния пластической прочности смеси на прочность печатных компози- тов	Образцы призмы 40 × 45 × 160 мм Образцы-кубы 40 × 40 × 30 мм	Консистенция готовой к употреблению смеси мелкозернистой смеси (В/Ц)	Осевое сжатие, перпендикулярно слоям	Прочность при сжатии, R_x^c
			Осевое сжатие, параллельно слоям	Прочность при сжатии, R_y^c
			Четырехточечный изгиб поперек границы слоя	Прочность при изгибе, R_{x1}^{fl}
			Четырехточечный изгиб вдоль границы слоя	Прочность при изгибе, R_{x2}^{fl}
			Сдвиг со скалыванием, параллельно слоям	Прочность сцепления слоев, R_y^{sp}

- влияние значений пластической прочности на прочностные характеристики 3D-печатных композитов.

Исследования второго эксперимента проводились на мелкозернистой готовой к употреблению смеси для 3D-печати (см. табл. 2.2).

Третий этап исследований включал в себя определение требований к параметрам контроля и диапазону регулирования технологических режимов 3D-печати (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Матрица третьего этапа эксперимента

Вид исследования	Объект исследования	Варьируемые факторы	Метод и средства исследований (контроля)	Контролируемые параметры
Установление корреляционной взаимосвязи между значениями реологических и технологических параметров оценки пластичности смесей	Готовые к употреблению смеси: мелкозернистая, патент RU 2729085 C1; микрозернистая, патент RU 2729283 C1	Консистенция готовой к употреблению смеси мелкозернистой (В/Ц) и микрозернистой (В/Т) смесей	Пластометр авторской конструкции	Пластическая прочность, $R_{пл}$
			Сдавливающая реометрия (метод Roussell'я [3]), испытательная система INSTRON 5982	Оценка предела пластичности. (при сдавливании), $K_i(I)$.
Определение точки оперативного контроля показателя технологичности смеси для 3D-печати	Готовые к употреблению смеси: мелкозернистая, патент RU 2729085 C1; микрозернистая, патент RU 2729283 C1	Место отбора проб для контроля: на входе и выходе из экструдера лабораторного 3D-принтера	Пластометр авторской конструкции	Пластическая прочность, $R_{пл}$

Задачи третьего этапа исследований:

- 1) установление корреляционной взаимосвязи между значениями реологического (оценка предела текучести при сдавливании $K_i(I)$) и технологического (пластической прочности $R_{пл}$) параметров оценки пластичности смесей;
- 2) определение точки оперативного контроля показателя технологичности смеси для 3D-печати;

З) анализ данных численного и физического экспериментов и определение требований к диапазону регулирования технологических режимов 3D-печати в зависимости от характеристик смеси.

Промышленная апробация разработанных методов управления процессом строительной 3D-печати. Задачей опытно-промышленной апробации была верификация разработанных методов управления и контроля процессом строительной 3D-печати в зависимости от технологических характеристик смеси и параметров печатаемого объекта. Исследования проводились на промышленном принтере модели «KEYCODE», изготовленного по техническому заданию ВГТУ (Приложение А). Техническое задание сформулировано по результатам изготовления, апробации лабораторного прототипа строительного 3D-принтера и разработки требований к технологическому комплексу для строительной 3D-печати (Свидетельство на секрет производства (ноу-хау) №2022001 [86], Приложение Б). Испытания проводились с использованием мелкозернистой смеси, запатентованного состава (см. табл. 2.2).

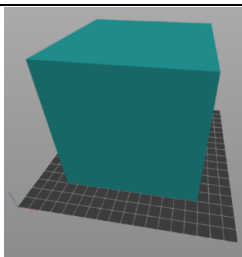
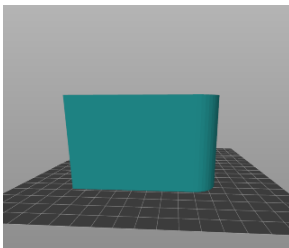
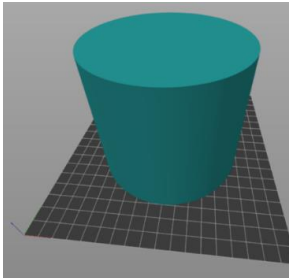
В процессе печати варьировались параметры процесса печати и технологические характеристики смеси в соответствии с граничными значениями, установленными на втором и третьем этапе исследований с учетом фактора масштабирования. Апробация режимов печати производилась для трех базовых геометрических моделей (таблица 2.6).

Контролируемыми параметрами являлись:

- пластичность смеси на выходе из экструдера в начале и в конце печати;
- объемный расход смеси в зависимости от скорости вращения шнека,
- устойчивость и геометрическое соответствие напечатанных объектов

CAD-модели.

Таблица 2.6 – Матрица промышленной апробации режимов печати

Характеристика объектов		Режимы печати		Контролируемые параметры		
Наименование	Модель	Наименование	Границы варьирования	Для смеси	Для режима печати	Для напечатанного объекта
Куб		Скорость печати	50-84 мм/с	Показатели пластичности Рпл после изготовления и в момент окончания печати	Объемный расход смеси	Устойчивость объекта; Параметры слоя; Высота печатного объекта
Размер основания 40 × 40 см		Скорость вращения шнека	120-170 об/мин			
		Высота печатаемого слоя	10-20 мм			
		Тип печати	Послойный режим			
		Диаметр сопла	20-27 мм			
Параллелепипед со скруглением		Скорость печати	84 мм/с	Показатели пластичности Рпл после изготовления и в момент окончания печати	Объемный расход смеси	Устойчивость объекта; Параметры слоя; Высота печатного объекта
Размер основания 35 × 20 см		Скорость вращения шнека	150-290 об/мин			
		Высота печатаемого слоя	10-20 мм			
		Тип печати	Режим «вазы» (печать по спирали)			
		Диаметр сопла	25 мм			
Цилиндр		Скорость печати	84 мм/с	Показатели пластичности Рпл после изготовления и в момент окончания печати	Объемный расход смеси	Устойчивость объекта; Параметры слоя; Высота печатного объекта
Диаметр основания 20 см		Скорость вращения шнека	160-170 об/мин			
		Высота печатаемого слоя	20 мм			
		Тип печати	Режим «вазы» (печать по спирали)			
		Диаметр сопла	30 мм			

2.3 Характеристика методов исследования

2.3.1 Методы исследования реологических и технологических свойств смеси

Сдвиговая реометрия. Для установления закономерностей образования, условий сохранения устойчивости и, наоборот, разрушения структур в концентрированных дисперсных системах необходимо определить взаимосвязь между реологическими характеристиками дисперсных систем и интенсивностью механических воздействий на них. Наибольшая информация в данном смысле может быть получена в результате построения полной реологической кривой течения дисперсной системы, выражающей зависимость равновесной степени разрушения структуры от скорости ее деформации $\dot{\epsilon}$ и или напряжения сдвига τ [87, 88]. Для получения полных реологических кривых исследуемых модельных систем, использовался ротационный вискозиметр «RHEOTEST 4.1» (рисунок 2.1). В качестве исполнительного механизма прибора использовались коаксиальные цилиндры с шириной зазора 2 мм, градиент скоростей сдвига изменялся от 1 до 437,4 с⁻¹.



Рисунок 2.1 – Ротационный вискозиметр RHEOTEST 4.1

При проведении измерений цементная смесь помещалась в коаксиальный цилиндр и устанавливалась в ротационный вискозиметр, после чего производилось изменение крутящего момента ротора, определяющегося датчиком угла вращения по закручиванию приводной пружины (метод CR) и по изменению силы тока в приводе (метод CR) для получения полной реологической кривой.

Сдавливашая реометрия. Метод разработан и апробирован в работе Russell'я [3]. При проведении испытаний цилиндрические образцы размером $R = h_0 = 25$ мм из свежеприготовленной смеси помещались между двумя гладкими пластинами, диаметр которых соответствует размеру образца. Испытания производились при нагружении с постоянной скоростью деформирования 5 мм/с при помощи испытательной системы INSTRON 5982. Количество испытаний - 3 образца на каждую контрольную точку.

Критерий пластичности (K_i) (оценка предела пластичности при сдавливании) определялся на основании построения и анализа кривых зависимости приведенной нагрузки F_j^* от относительного изменения высоты образца h_i/R :

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

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

Разработка оперативного метода и прибора контроля пластичности. Анализ напряжений, возникающих на двух стадиях процесса печати: экструзии и формировании слоя (таблица 2.7), показывает, что контролируемый параметр технологичности смеси должен характеризовать её способность сопротивляться касательным и сдавливающим напряжениям. Величина пластической прочности $P_{пл}$ может быть рассмотрена в качестве универсальной характеристики технологичности смеси для 3D-печати. Применяемый в настоящее время пенетрометрический метод не дает адекватной оценки пластической прочности, так как в стандартных пенетрометрах используется цилиндрический плунжер, при погружении которого в смесь возникают только сдавливающие напряжения.

Таблица 2.7 – Анализ напряжений

Стадия 3D-печати	Напряжения, возникающие в смеси на разных стадиях печати	Физический смысл показателя пластической прочности
Экструзия	Касательные и нормальные напряжения при сдавливании смеси в экструдере с заданной скоростью экструзии	Оценка способности смеси сопротивляться действию касательных напряжений в зоне боковой поверхности плунжера и нормальных напряжений под плунжером
Формирование слоя	Нормальные напряжения от собственного веса слоя	

При использовании традиционного пластометра конструкции МГУ пластическая прочность измеряется как показатель сопротивления вдавливанию конуса, при погружении которого в смесь возникают сдавливающие и сдвиговые напряжения.

Поэтому при разработке прибора в качестве аналога принят метод П.А Ребиндера [89], реализованный на пластометре конструкции МГУ [90]. Метод измерения пластической прочности на коническом пластометре основан на определении нагрузки, необходимой для погружения металлического конуса с заданным углом при вершине в исследуемую массу на фиксируемую глубину. При погружении конуса образуется усилие Н/м, которое считывает тензодатчик, эти значения микроконтроллер подставляет в известное уравнение 2.3.

$$P_m = K_a \times F / h_m^2 \quad (2.3)$$

где P_m пластическая прочность, K_a константа конуса, F прикладываемое усилие, h_m глубина погружения конуса.

В качестве исполнительного механизма принят конус пластометра конструкции МГУ с углом 45° , глубина погружения конуса h_m - 20 мм (рисунок 2.2).

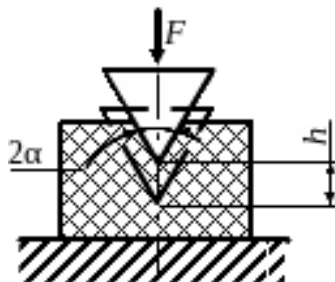


Рисунок 2.2 – Схема конуса

2α - угол конуса, h_m - глубина погружения, F - прикладываемое усилие

Для автоматизации и улучшения результатов расчетов, прибор создан на базе микроконтроллера «Arduino Nano» (рисунок 2.3). При погружении конуса в смесь, на заданную глубину, происходит считывание прилагаемого усилия тензодатчиком. После микроконтроллер рассчитывает пластическую прочность (смотри уравнение 2.1) и выводит максимальные значения на экран.

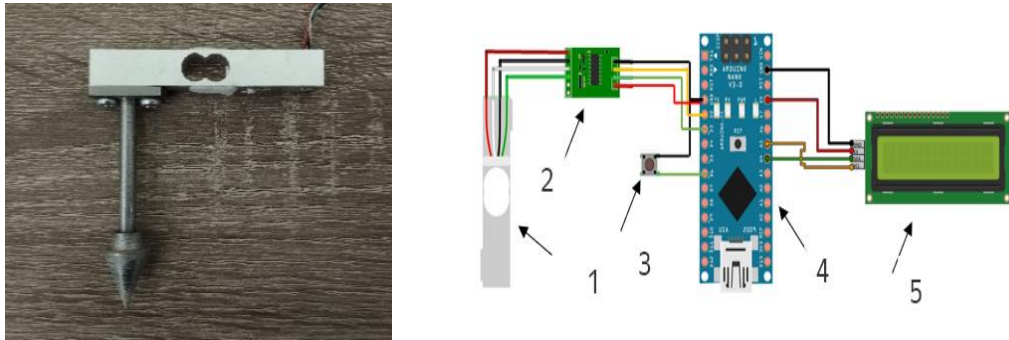


Рисунок 2.3 – Схема устройства авторского пластометра:
1 - тензодатчик, 2 - плата преобразования импульсов, 3 - вычислительная плата, 4 - кнопка сброса данных, 5 - монохромный дисплей

Для верификации метода и прибора использовался грунтовый универсальный пенетромтр Georocket S068 (рисунок 2.4) с диаметром плунжера 25 мм. Данный прибор был выбран из-за схожести принципов измерения. Также применимость данного прибора была доказана в работах Д.С. Бабенко [91-93].



Рисунок 2.4 – Грунтовый универсальный пенетромтр Georocket S068

Смесь в заданные сроки испытаний укладывалась в кольцо диаметром 150 мм и высотой 55 мм. Испытания производились непосредственно после

укладки смеси, во временном интервале 5-60 минут с шагом 5 минут. Измерения производились, погружением плунжера пенетрометра до заданной риски, на глубину 5 мм. Количество измерений - 6 на каждое время измерения. По результатам испытаний оценку пластической прочности ($P_{пл}$) определяют как приведенную величину сопротивления пенетрации:

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

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

2.3.2 Методы исследования модельных 3D-печатных элементов

Методы изготовления и оценки качества модельных 3D-печатных элементов. При обосновании требований к реологическим и технологическим характеристикам смесей по критериям устойчивости печатных объектов (первый этап эксперимента, см. табл. 2.4) производилась печать модельных элементов по схеме, представленной на рисунке 2.5. При проведении исследований приняты следующие режимы печати: постоянная скорость печати 12 мм/с, постоянное расстояние между соплом и слоем - 5 мм; скорость вращения шнека 35 об/мин.

Задание параметров печати производилось в программном комплексе «SuperSlicer» версии 2.7.62.0 (рисунок 2.6). Данный ПК позволяет осуществлять подготовку CAD-моделей к печати, задавая необходимые параметры процесса печати и создавать заданные данные в G-code понятный принтеру для осуществления печати. В данную программу загружается CAD-модель изделия с заданной геометрией, в процессе подготовки моделей использовался режим генерации периметров Archipe, далее задаются параметры печати, такие как: скорость печати, высота печатного слоя, диаметр сопла, объем выходящей смеси. После задания параметров программа генерирует машинный G-code, содержащий траекторию печати в виде координат и команды для выполнения задач (рисунок 2.7), который загружается непосредственно на 3D-принтер.

Принтер считывает и производит выполнение действий в процессе 3D-печати согласно созданной программе. После печати производилась оценка качества напечатанных элементов фиксацией результатов на фотоаппарат Fujifilm X-A7 с разрешением 1920×1080 .

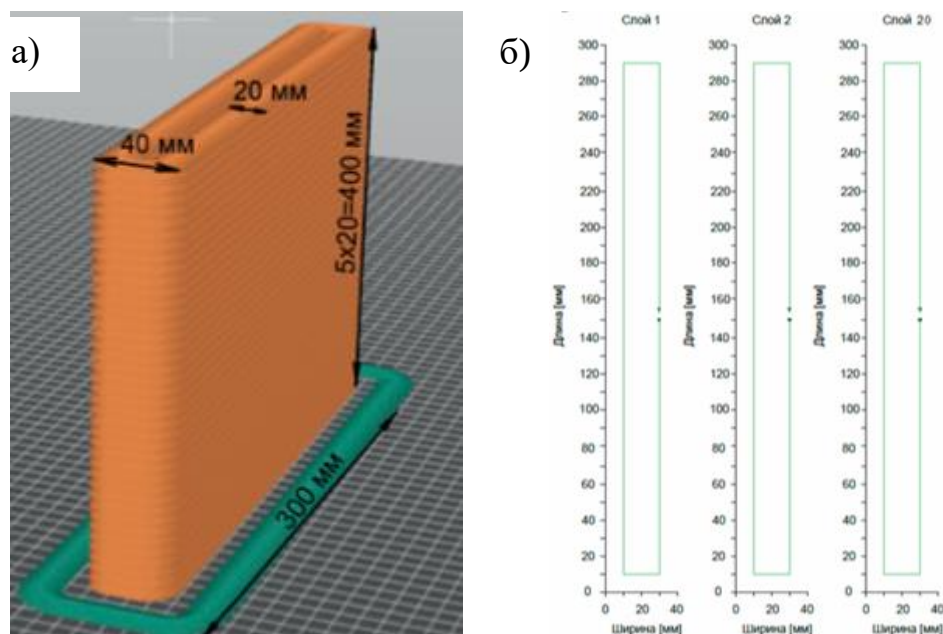


Рисунок 2.5 – Схема печати модельных элементов: а) общий вид печати образцов б) схема печати модельного элемента по слоям

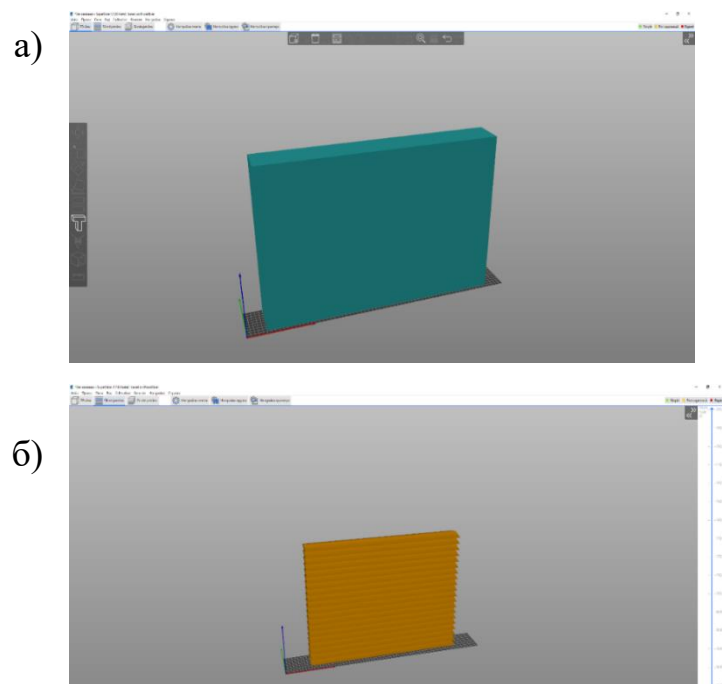


Рисунок 2.6 – Интерфейс программного комплекса «SuperSlicer» для подготовки моделей к печати:

а) CAD-модель, б) CAD-модель нарезанная на слои

```

1 M107
2 G28
3 G1 Z5 F5000
4 G21
5 G90
6 M82
7 G92 E0
8 G1 X314.785 Y25 F3000
9 G1 F900
10 G1 X314.785 Y34.785 E1.33979
11 G1 X35.215 Y34.785 E39.61783
12 G1 X35.215 Y15.215 E42.29741
13 G1 X314.785 Y15.215 E80.57544
14 G1 X314.785 Y22 E81.50448
15 G1 X304.785 Y30.774 F3000
16 G1 Z15 F3000
17 G92 E0
18 G1 X314.571 Y34.571
19 G1 F900
20 G1 X35.429 Y34.571 E73.89612
21 G1 X35.429 Y15.429 E78.96341
22 G1 X314.571 Y15.429 E152.85953
23 G1 X314.571 Y31.571 E157.13264
24 G1 X297.25 Y24.571 F3000
25 G1 Z25 F3000
26 G92 E0
27 G1 X314.571 Y25
28 G1 F900
29 G1 X314.571 Y34.571 E2.53364
30 G1 X35.429 Y34.571 E76.42977
31 G1 X35.429 Y15.429 E81.49705
32 G1 X314.571 Y15.429 E155.39318
33 G1 X314.571 Y22 E157.13264
34 G1 X304.571 Y30.774 F3000
35 G1 Z35 F3000
36 G92 E0
37 G1 X314.571 Y34.571

```

Рисунок 2.7 – Фрагмент G-code для принтера

Для верификации результатов численного моделирования (первый этап эксперимента, см. табл. 2.4) производилась печать образцов в один слой и в один проход (рисунок 2.8). В процессе использовалось два типа сопла (круглое диаметром 20 мм и прямоугольное 45×15 мм), постоянная скорость экструзии (15 мм/с) и движения сопла (10 мм/с), высота укладки смеси (20 и 25 мм) длинна образцов 300 мм. Были приняты следующие режимы печати: постоянная скорость печати 12 мм/с, расстояние между соплом и слоем - 20-25 мм, скорость вращения шнека 35 об/мин.

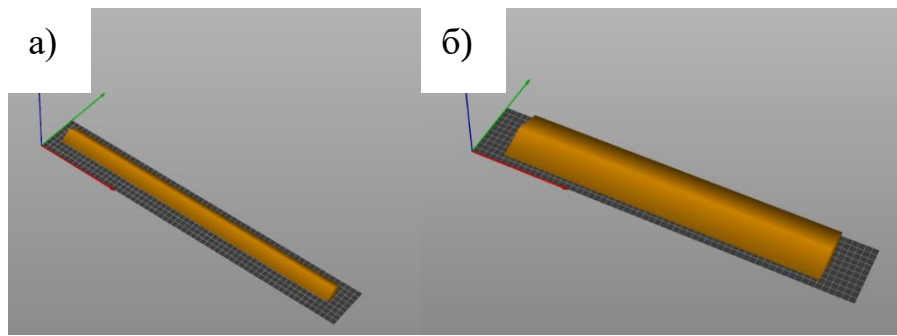


Рисунок 2.8 – Схема печати модельных элементов:
 а) общий вид печати образцов;
 б) схема печати модельного элемента по слоям

Напечатанные одно- и многослойные элементы после твердения разрезали на части длиной 50 мм. Полученная поверхность образцов зачищалась с помощью мелкозернистой шлифовальной бумаги Р240 и обеспыливалась влажной салфеткой. Подготовленные к испытанию поверхности помещались на МФУ устройство «LaserJet Pro MFP M426dw». Образец располагался распилком на сканируемую часть подложки. После чего происходило сканирование образца в формате PDF. На отсканированный образец наносилась разметка геометрии с помощью базового ПК Microsoft Word версии 2019. После этого происходило наложение полученной модели при моделировании на размеченный образец. Тем самым производилось сравнение достоверности геометрии получаемой модели.

При изучении влияния пластической прочности смеси на качество печатных объектов и прочность слоистых 3D-печатных композитов (второй этап эксперимента, см. табл. 2.5) производилась печать модельных стеновых элементов длиной ~ 20-30 см, шириной 4 см, высотой 10-12 см. Сечение одного слоя составляет $4 \times 1,5$ см, количество печатных слоев - 10-12 шт. Схема печати модельной конструкции представлена на рисунке 2.9. При проведении исследований использовалась программа для подготовки CAD-моделей к печати «SuperSlicer», приняты следующие режимы печати:

- постоянная скорость печати 7 мм/с;
- постоянное расстояние между соплом и слоем - 2 см.

- скорость вращения шнека 35 об/мин.

После печати производилась фотосъемка на экшен-камеру (action camera) с разрешением 1920×1080 и скоростью съемки 50 кадров/с, после через программное обеспечение выбирался наиболее подходящий кадр съемки.

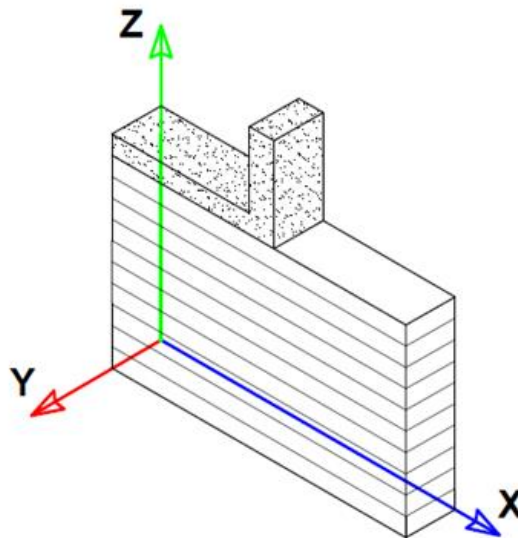


Рисунок 2.9 – Схема печати образцов

Для оценки качества печатных элементов производилась измерение и оценка:

- деформаций отдельных слоев по вертикали и горизонтали с точностью 0,5 мм.

По результатам измерений рассчитывались следующие показатели:

- относительные продольные деформации слоя по формуле:

$$\varepsilon_{\text{прод}} = \frac{\Delta_{\text{прод}}}{l_{\text{эт}}} \quad (2.5)$$

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:

$$\varepsilon_{\text{поп}} = \frac{\Delta_{\text{поп}}}{l_{\text{эт}}} \quad (2.6)$$

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:

$$\nu = \frac{\varepsilon_{\text{поп}}}{\varepsilon_{\text{прод}}} \quad (2.7)$$

Также производилось измерение общей вертикальной деформации стены (Δ) с точностью 1 мм; оценка дефектности слоев конструкции по результатам фотофиксации по окончанию печати. Для получения снимков использовалась цифровая камера.

Оценка прочностных характеристик 3D-печатных образцов. При организации испытаний исходили из следующего. В связи с отсутствием стандарта для испытаний 3D-печатных композитов, обоснование схем испытания, формы и размеров контрольных образцов принимали исходя из того, что прочностные характеристики печатных образцов [94-104] определяются в двух [105-109] или трех [110-113] направлениях приложения нагрузки по отношению к направлению печати:

X - направление вдоль траектории движения печатного сопла;

Y -направление поперек траектории движения печатного сопла,

Z - направление, перпендикулярно плоскости X и Y.

Анализ результатов исследований позволил установить, что наиболее существенные отличия получены при приложении нагрузки по X и Z.

Поэтому были приняты следующие схемы разрезки (рисунок 2.10) и испытаний 3D-печатных композитов (рисунок 2.11):

- испытание на сжатие при приложении нагрузки поперёк (ось Z) направления и вдоль (ось X) направления печати (по 6 образцов в серии);

- испытание на изгиб при приложении нагрузки поперёк (ось Z) направления и вдоль (ось Y) печатных слоев (по 6 образцов в серии);

- испытание на сдвиг со скалыванием при приложении нагрузки вдоль печатных слоев (ось X) (по 3 образца в серии).

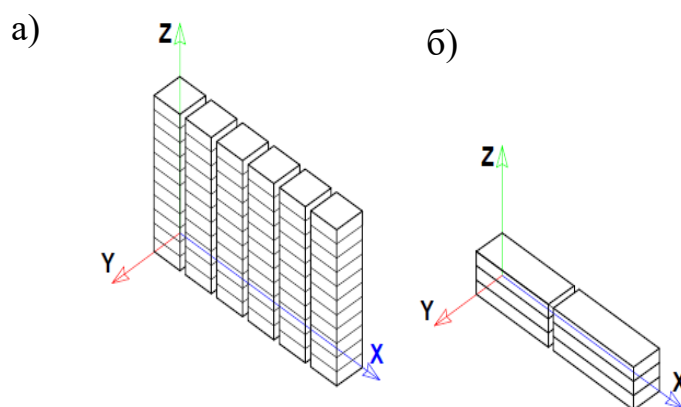


Рисунок 2.10 – Схема разрезки 3D-печатной модельной конструкции:
(а) испытание на сжатие (ось Z), (б) испытание на сжатие (ось X) и изгиб (оси Y, Z)

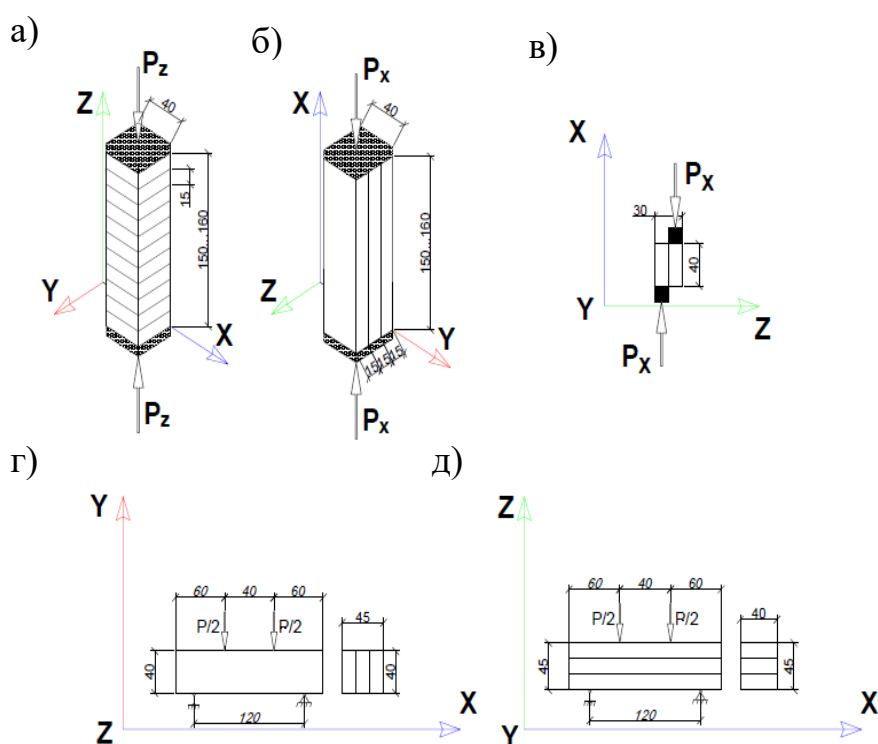


Рисунок 2.11 – Схемы испытаний 3D-печатных образцов:
(а) испытание на сжатие (ось Z), (б) испытание на сжатие (ось X), (в) испытание на раскалывание (ось X), (г) испытание на четырёхточечный изгиб (ось Y), (д) испытание на четырёхточечный изгиб (ось Z)

2.3.3 Методика численного моделирования

Методика разработана совместно с В.Г. Теличко [114], в рамках выполнения гранта Российского научного фонда (проект 22-19-00280-П). Для моделирования потока смеси использован метод конечных объемов (МКО, FVM),

который является одним из наиболее распространенных численных методов для моделирования гидродинамических процессов, а также процессов теплообмена. Такой выбор метода для моделирования процесса 3D-печати обусловлен его доказанной эффективностью при решении задач моделирования систем со сложной геометрией, потока жидкости со свободными поверхностями (метод объёма жидкости (Volume of Fluid, VOF)) [115] для неструктурированных сеток. В качестве входных параметров используются экспериментальные данные о реологических параметрах цементных матриц и режимов печати, полученные на втором и третьем этапах эксперимента.

Моделирование реализуется в программном комплексе CFD ANSYS Fluent R23.1, недостающий функционал реализован в виде пользовательских подпрограмм UDF на языке программирования C++. Последовательность шагов при моделировании представлена на рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 – Общий алгоритм численного моделирования

Основные этапы численного моделирования:

1) Создание геометрии области печати в Space Claim рисунок 2.13. На этом этапе в модуле Ansys Space Claim строится трёхмерная или двумерная геометрия расчётной области. Определяются все твёрдые тела, поверхности и объёмы, которые будут участвовать в моделировании. На данном этапе задаются геометрические размеры и параметры: диаметр сопла, форма сопла, расстояние до подложки, размеры печатной камеры. Геометрия экспортируется в формате, совместимом с последующей генерацией сетки.

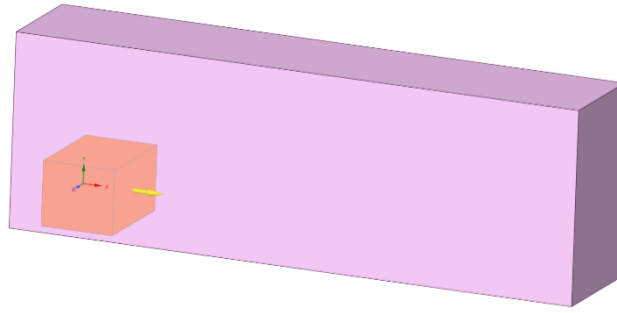


Рисунок 2.13 – Пример создания геометрии в Space Claim

2) Создание сетки элементов для гидродинамического расчета в ANSYS Mechanical (рисунок 2.14). Готовая геометрия передается в ANSYS Mechanical. Здесь для каждой части расчётной области генерируется своя сетка элементов (неструктурированная или структурированная). Для использования overset-подхода [40] (применяется для моделирования движения сопла в ANSYS Fluent) создаются отдельные, перекрывающиеся сетки для разных зон (например, одна сетка для сопла, другая - для области печати). Настраиваются размеры элементов, сгущения в пограничных слоях и качество сетки (ортогональность, аспектное отношение).

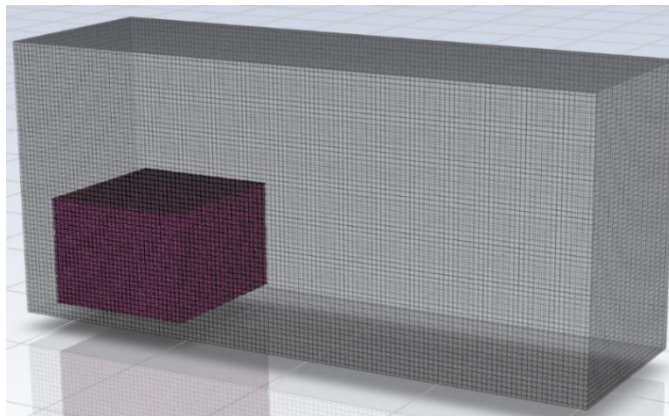


Рисунок 2.14 – Упрощенный вариант моделирования прямоугольного сопла вид разбиения на отдельные ячейки зоны печати (фоновая сетка, обозначена серым) и компонентной сетки (overset зона, эмулирующее сопло и прилегающие области, бордовый)

3) Импорт модели в среду Ansys Fluent. Созданные сетки загружаются в решатель Ansys Fluent. При импорте проверяется целостность сеток, отсутствие выпадающих элементов и корректность границ. Если сетки были сохранены в отдельных файлах, они объединяются в один расчётный проект. Fluent распознаёт зоны (cell zones) и граничные условия (boundary zones), заданные на предыдущем этапе (при правильном наименовании). На этом этапе также задаются реологические параметры смеси, полученные на прошлых этапах эксперимента (смотри второй этап эксперимента):

- статическая вязкость η_0 , Па·с;
- динамическая вязкость η , Па·с;
- эффективная вязкость η^*_0 , Па·с;
- предел текучести τ_{k2} (по Бингаму), Па.

Эти значения вводятся как свойства материала (как неньютоновская жидкость) в Fluent.

4) Создание *overset* интерфейса (сопло) рисунок 2.15. Внутри Fluent настраивается *overset* (перекрывающийся) интерфейс для области сопла. Указываются две группы ячеек: «фоновая» сетка и «вложенная» сетка (сопло). Определяется тип интерфейса (*overset mesh interface*). Решатель автоматически вычисляет, какие ячейки одной сетки находятся внутри другой, и устанавливает связь для передачи параметров потока через границы перекрытия. Это позволяет моделировать движение сопла относительно основной области без перестроения сетки.

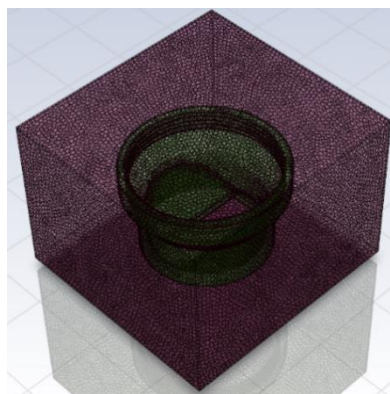


Рисунок 2.15 – Пример компонентной сетки с соплом внутри (прямоугольное сопло 45x15 мм)

5) Задание граничных условий и настроек решателя. Перед запуском расчёта задаются физические и численные параметры, а также тип решателя. Назначаются следующие граничные условия:

1. вход в сопло - задаётся объёмный расход смеси. Эти значения берутся из лабораторных экспериментов, где фиксировалась производительность экструдера при разных оборотах шнека;

2. границы расчётной области - открытые границы (давление окружающей среды);

3. параметры процесса печати, такие как скорость перемещения сопла, также задаются на этом этапе через UDF (зависимость от времени).

6) Сборка библиотеки пользовательских функций UDF. На этом этапе в Ansys Fluent загружаются и компилируются пользовательские функции (UDF) на языке C++, которые описывают ключевые технологические параметры процесса 3D-печати. Через UDF задаются: параметры процесса:

- диаметр сопла $D_{\text{сопла}}$, мм;
- скорость подачи материала U , см³/с;
- скорость движения сопла V , мм/с;
- параметр относительной скорости перемещения сопла V/U .

Для каждого временного шага вычисляется текущее положение сопла, что позволяет обновлять overset-интерфейс (перемещение сетки сопла относительно фоновой сетки).

В UDF реализуется переключение реологической модели в зависимости от времени, прошедшего после укладки материала в данную точку (так называемый «aging» или «структурообразование»).

7) Инициализация зоны печати и зоны сопла. После задания всех условий и загрузки UDF производится инициализация решения. Для каждой зоны (печать, сопло) задаются начальные поля давления, скорости.

8) Запуск решения. На последнем этапе запускается итерационный процесс расчёта. На каждом временном шаге контролируются сходимость по

невязкам, интегральные параметры (расход, подъёмная сила) и физическая достоверность полей. При необходимости корректируются параметры релаксации, шаг по времени или критерии останова. После достижения требуемой точности расчёт останавливается, результаты сохраняются для постобработки.

2.3.4 Методика опытно-промышленной апробации технологических параметров процесса 3D-печати

Промышленная апробация производилась на промышленном принтере «KEYCODE» модели «КРАФТЕР-У» (рисунок 2.16). Принтер имеет порталную конструкцию с рабочей областью печати $2000 \times 3000 \times 1000$ мм, регулируемой высотой слоя от 5 до 50 мм и шириной слоя 20-70 мм. Перемещение по осям X и Y выполняется со скоростью до 300 мм/с, по оси Z - до 10 мм/с. Экструдер объёмом до 20 л оснащён шнеком (частота вращения до 750 об/мин) и допускает установку сменных сопел диаметром 20-40 мм; максимальная фракция заполнителя смеси - 5 мм.

Принтер оснащён автоматической системой приготовления смеси, в состав которой входят: ленточный конвейер с приёмным бункером объёмом 60 л для загрузки сухих компонентов в турбулентный высокоскоростной смеситель, под которым расположена промежуточная ёмкость (бункер-накопитель) для готовой растворной смеси объёмом 90 л. Ёмкость соединена с перистальтическим насосом, обеспечивающим перекачивание смеси к экструдеру.



Рисунок 2.16 – Промышленный принтер «KEYCODE»

Система приготовления полностью автоматизирована и синхронизирована с работой принтера, что позволяет осуществлять непрерывную подкачку смеси непосредственно в процессе печати. Технические характеристики принтера представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Технические характеристики 3D-принтера «KEYCODE»

Наименование	Параметры
Тип принтера	Портальный
Габаритные размеры принтера (ДхШхВ)	3000 × 4000 × 3500 мм
Область печати	2000 × 3000 × 1000 мм
Регулируемая высота печатного слоя	5-50 мм
Ширина печатного слоя	20-70 мм
Скорость движения по ширине и длине	20-300 мм/сек
Скорость движения по высоте	10 мм/сек
<i>Экструдер</i>	
Объем готовой растворной смеси	3-20 л
Максимально допустимая фракция заполнителя смеси	до 5 мм
Скорость вращения шнека	0-750
Возможность установки сменных сопел разного сечения с диаметром	20-40 мм
<i>Система подачи материала</i>	
Система загрузки сыпучих материалов	Ленточный конвейер.
Емкость приемного бункера	60 л
Разрывная пластина на решетке бункера	+
Возможность автоматической работы в связке со смесителем	+
<i>Система перекачивания</i>	
Тип насоса	Перистальтический
Максимально допустимая крупность заполнителя перекачиваемой смеси	до 5 мм
Давление и расход насоса	Подача материала на длину - до 30 м и высоту - до 8м
<i>Смеситель в сборе</i>	
Смеситель	Турбулентный, высокоскоростной
Объем загрузки	20-60 л
Частота вращения смесителя	до 800 об/мин
Промежуточный бункер-накопитель растворной смеси	90 л
<i>Программное обеспечение платы управления 3D-принтером</i>	
Программное обеспечение для подготовки CAD-моделей	SuperSliser
Программное обеспечение для управления 3D-принтером	Pumotix
<i>Управляющий компьютер</i>	
Операционная система	Windows 10
Оперативная память	16 ГБ
Память на твердотельном накопителе	512 ГБ
Процессор	Intel Core i3

Методика подготовки процесса 3D-печати. Работа с промышленным принтером «KEYCODE» включает четыре последовательных этапа, каждый из которых направлен на обеспечение корректного преобразования цифровой модели в физический объект с требуемыми геометрическими характеристиками и качеством поверхности.

Подготовка CAD-моделей и слайсинг. Цель этапа - преобразовать трёхмерную геометрию изделия в послойную траекторию движения инструмента с заданными технологическими параметрами.

Геометрия испытываемых элементов (параллелепипед со скруглением, цилиндр, куб) проектировалась в ПК SolidWorks 2025 и экспортировалась в формат 3mf. Полученные файлы загружались в слайсер SuperSlicer версии 2.7.62.0-beta2, где выполнялось послойное разбиение с варьированием высоты слоя в диапазоне 10-25 мм. Для каждого варианта назначался диаметр сопла из интервала 20-30 мм. Такой подход позволял исследовать влияние высоты слоя и диаметра сопла на формоустойчивость и качество поверхности.

Параметры печати принимались следующими:

- скорость линейного перемещения экструдера F3000-5000 (50-84 мм/с);
- скорость вращения шнека S120-290 (120-290 об/мин);
- печать выполнялась в один проход на периметр (одинарная стенка) с шириной, равной диаметру сопла;
- использовались два режима: классический послойный (с разрывом контура на каждом слое) и режим «вазы» (непрерывная спираль с плавным подъёмом по Z). Режим «вазы» применялся для оценки возможности безостановочной укладки и её влияния на однородность слоя.

На рисунке 2.17, а представлена исходная CAD-модель куба, на рисунке 2.17, б - её послойное представление с указанием границ слоёв. CAD-модели остальных форм (параллелепипеды со скруглениями, цилиндры) приведены в приложении В.

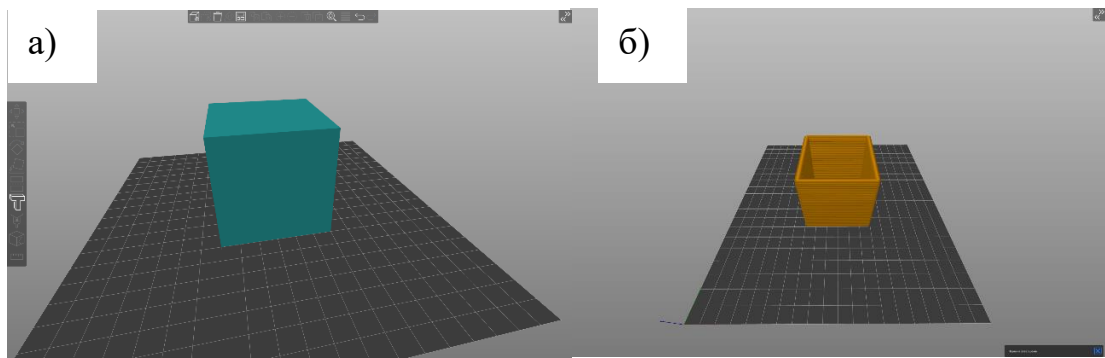


Рисунок 2.17 – Схемы печати 3D-печатных образцов в виде куба размерами $300 \times 300 \times 300$ мм: а) CAD-модель, б) CAD-модель по слоям

Постобработка управляющего кода. Сгенерированный слайсером G-код содержит команды, ориентированные на FDM-печать пластиком (управление температурой, обдув, сброс координат и др.), которые не поддерживаются системой управления строительным принтером «PUMOTIX». Для исключения сбоев и обеспечения корректной интерпретации команд требовалась адаптация кода. Для этого использовалась следующая последовательность действий:

- удаление комментариев и неиспользуемых параметров с помощью регулярного выражения «;.*» (рисунок 2.18);
- удаление пустых строк штатной командой редактора (рисунок 2.19);
- проверка наличия стартовых и завершающих команд, при необходимости их добавление.

В результате получали адаптированный машинный код (рисунок 2.20), содержащий исключительно инструкции, распознаваемые «PUMOTIX». Это обеспечивало бесперебойную работу принтера и снижало вероятность ошибок позиционирования.

Визуальная верификация траектории. Перед загрузкой в принтер отредактированный файл проверялся в программе NC Corrector V4.0 (рисунок 2.21). Цель верификации - заблаговременно выявить разрывы, самопересечения траектории или выходы за пределы рабочего поля (1000×1000 мм), которые могли возникнуть при слайсинге или постобработке. Дополнительно запускалась динамическая симуляция процесса печати (рисунок 2.22) для визуальной оценки последовательности наращивания слоёв. Это позволяло

исключить брак и сократить нерациональный расход материала до начала реальной печати.

Управление печатью в реальном времени. Верифицированный G-код загружался в систему управления «PUMOTIX» (рисунок 2.23). Оператор выполнял калибровку начала координат по осям X, Y, Z относительно пластикового поддона размером 1000×1000 мм. В процессе печати PUMOTIX позволял динамически изменять скорость перемещения экструдера (F) и скорость вращения шнека (S) без перезапуска программы. Такая возможность использовалась для оперативной подстройки режимов под текущее состояние смеси, однако выполнялась вручную на основании визуальных признаков пластичности. Данное обстоятельство подчёркивает необходимость перехода к автоматизированному контуру управления, в котором параметры процесса корректируются по объективным показаниям датчика пластической прочности.

Запуск и фиксация параметров процесса. Для оценки влияния реологического состояния смеси и режимов печати на устойчивость конструкций различной формы выполнялась серия экспериментов с целенаправленным варьированием следующих факторов:

- вид образца: прямоугольная призма со скруглением, куб, цилиндр;
- начальная пластическая прочность смеси $P_{пл}$, изменяемая путём корректировки водоцементного отношения;
- диаметр сопла: 20, 25 и 30 мм;
- высота укладываемого слоя: 10, 20 и 25 мм;
- скорость движения сопла: от 50 до 83 мм/с;
- частота вращения шнека: от 160 до 290 об/мин.

а)

```

1 ; generated by SuperSlicer 2.7.62.0-beta2 on 2026-05-12 at 09:56:38 UTC
2 ;
3 ;
4 ; external perimeters extrusion width = 32.58mm
5 ; perimeters extrusion width = 34.08mm
6 ; infill extrusion width = 33.22mm
7 ; solid infill extrusion width = 34.72mm
8 ; top infill extrusion width = 33.22mm
9 ; first layer extrusion width = 33.30mm
10 ;
11 ;
12 ; object:[name]:"_Box id:10 copy 0","id":0,"object_id":0,"copy":0,"object_center":[440.186,448.554,0.000],"boundingbox_center":[440.186,448.554,
13 ; plateer:[,"object_center":[440.186,448.554,0.000],"boundingbox_center":[440.186,448.554,300.000],"boundingbox_size":[600.000,600.000,600.000],"cut
14 ;
15 ;
16 ;
17 ;TYP:E:Custom
18 ;S500
19 ;O5000
20 ;Q0 Z26
21 ;G0
22 ;G0 Z10
23 ;M03
24 ;M10 P1
25 ;G04 P0.3
26 ;
27 ;
28 ;L:AY:ER_CH:ANG:E
29 ;Z:15
30 ;H:EIGHT:15
31 ;M11 P1
32 ;M05
33 ;G1 Z15
34 ;G1 Z35
35 ; printing object _Box id:10 copy 0
36 ;G1 X723.536 Y731.904
37 ;G1 Z15
38 ;
39 ;TYP:E:External perimeter
40 ;MIDTH:33.299999
41 ;G800;
42 ;G1 X156.836 Y731.904 ;A361.74618
43 ;G1 X156.836 Y165.204 ;A723.49236
44 ;G1 X723.536 Y165.204 ;A1085.23854
45 ;G1 X723.536 Y727.404 ;A1444.1122
46 ;S:E:AM:723.536/731.904
47 ;MIP:E_ST:ART
48 ;G1 X697.556 Y716.904
49 ;MIP:E_ST:END
50 ;L:AY:ER_CH:ANG:E
51 ;Z:30
52 ;H:EIGHT:15
53 ;M11 P1
54 ;M05
55 ;G1 Z30
56 ; stop printing object _Box id:10 copy 0
57 ;M03
58 ;M10 P1
59 ;G04 P0.3
60 ;G1 Z50
61 ; printing object _Box id:10 copy 0
62 ;G1 X723.899 Y732.266
63 ;G1 Z30
64 ;MIDTH:32.575222
65 ;G800;
66 ;G1 X156.474 Y732.266 ;A1797.59391

```

б)

Рисунок 2.18 – Фрагмент G-code для 3D принтера: а) вид базового G-code до обработок, б) введение команды «;.» для удаление лишних команд после «;» в программе блокнот

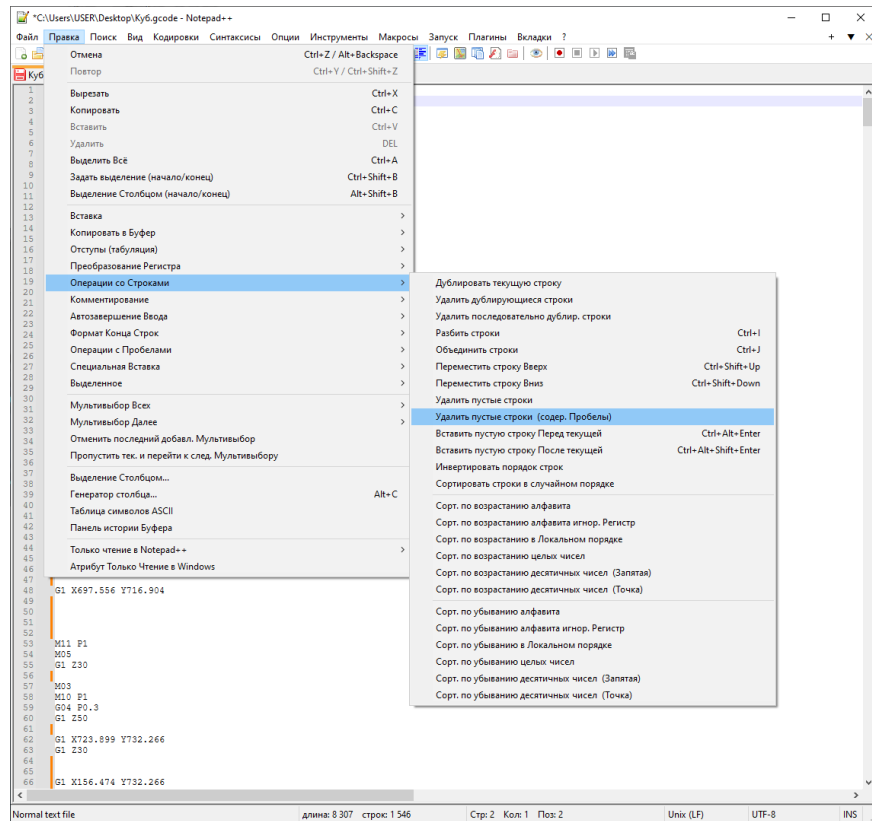


Рисунок 2.19 – Выбор команды для удаления пустых строк в программе блокнот

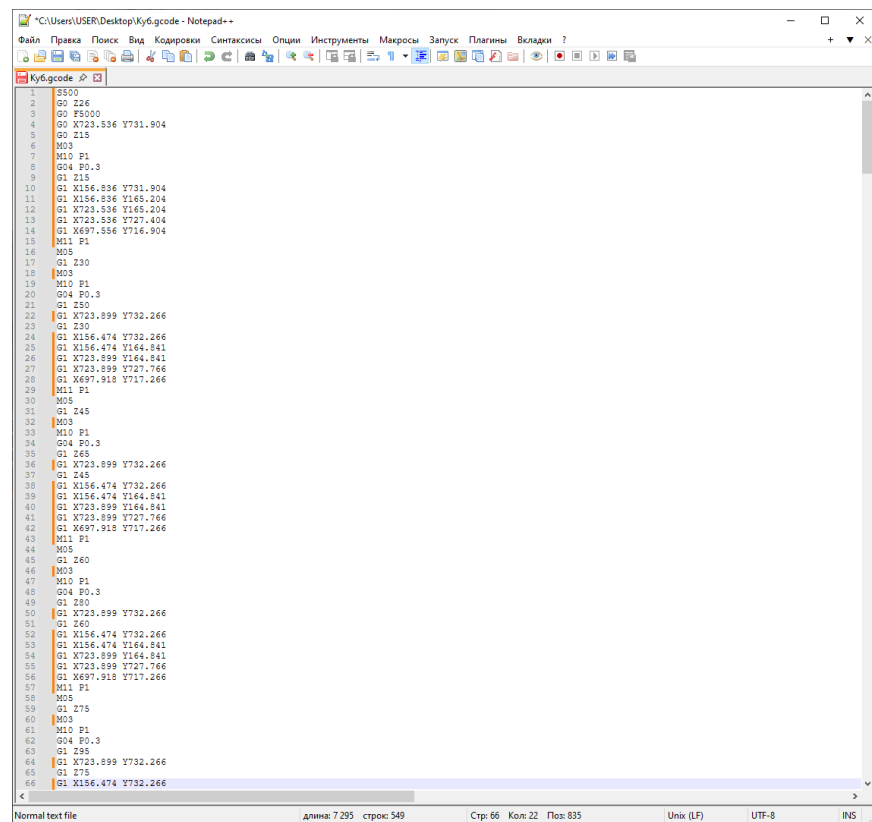


Рисунок 2.20 – Адаптированный машинный код

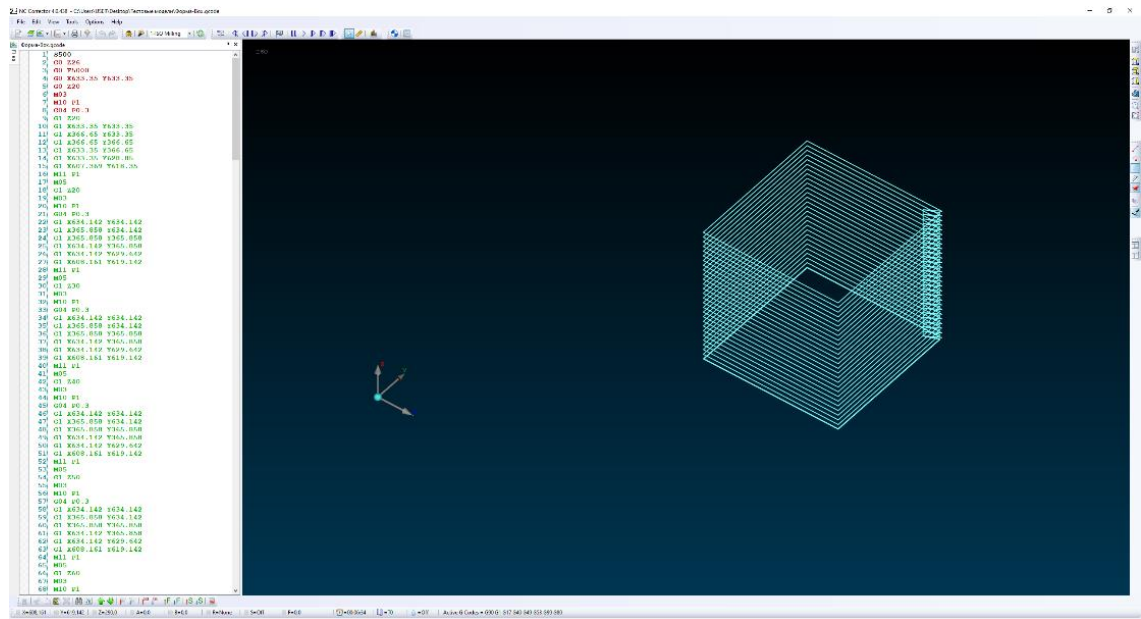


Рисунок 2.21 – Интерфейс программы для визуальной проверки целостности программы

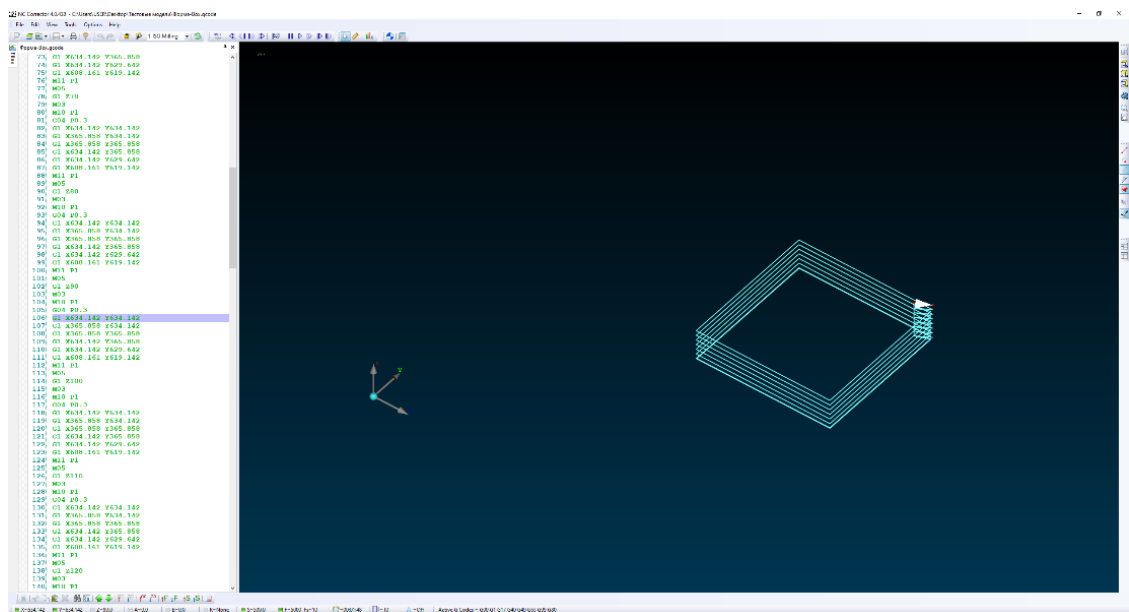


Рисунок 2.22 – Визуальная симуляция процесса печати

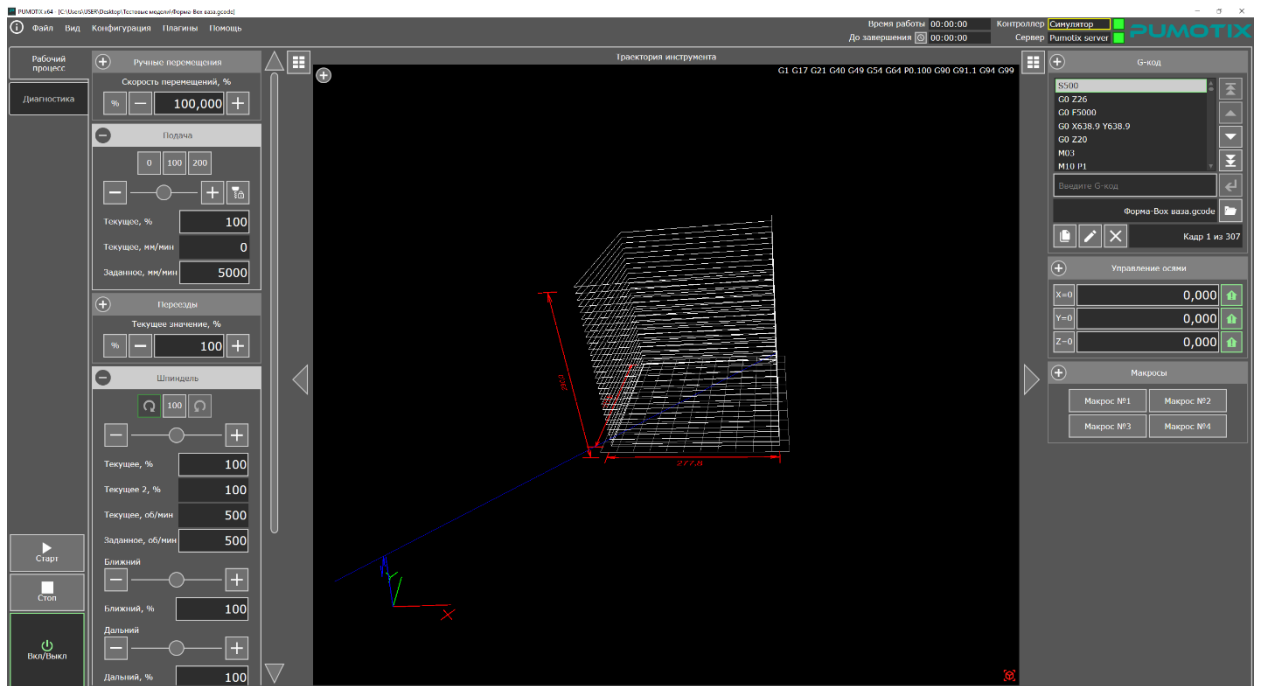


Рисунок 2.23 – Интерфейс программы «PUMOTIX» для управления принтером «KEYCODE»

Для каждого варианта сочетания геометрии, свойств смеси и параметров процесса выполнялась печать до появления признаков потери устойчивости (оплывание, деформация нижних слоёв, разрушение) либо до достижения предельной высоты, ограниченной исследуемой модели. Такой подход позволил охватить широкую область режимов печати и в дальнейшем установить количественные границы применимости, связывающие пластичность смеси, геометрию объекта и параметры экструзии и послойной укладки.

В ходе печати каждого образца фиксировались следующие контролируемые показатели:

- пластическая прочность смеси $P_{пл}$, измеренная разработанным прибором непосредственно после приготовления и перед началом укладки;
- устойчивость возводимого элемента, оцениваемая визуально по отсутствию оплывания, деформаций нижних слоёв и разрушений;
- геометрические параметры единичного слоя (высота, ширина), определяемые после завершения печати;

- максимальная достигнутая высота объекта (в миллиметрах и количестве слоёв) до появления признаков потери формоустойчивости.

К задаваемым параметрам, определявшим режим работы принтера, относились: начальная пластичность смеси $P_{пл}$ (как входное условие для выбора режимов), скорость линейного перемещения экструдера, частота вращения шнека, диаметр сопла и высота укладываемого слоя. Фактические значения всех параметров заносились в протокол испытаний для каждого образца.

Определение объёмного расхода смеси. Для получения данных, необходимых для синхронизации проектной (численного моделирования процесса) и технологической стадий, проводились стендовые измерения массового расхода смеси через сопла различного диаметра. Экструдер оснащался соплами диаметрами 27, 30 и 33 мм, после чего при фиксированных оборотах шнека (задаваемых в системе управления до редуктора) регистрировалась масса материала, выдавливаемого за единицу времени. По результатам строились кривые зависимости массового расхода от скорости вращения шнека. Пересчёт массового расхода в объёмный осуществлялся делением на плотность свежеприготовленной смеси. Полученные зависимости позволяли в дальнейшем:

- прогнозировать темп укладки материала и длительность печати;
- задавать граничные условия по расходу в CFD-моделях течения смеси;
- обоснованно назначать начальные значения подачи материала при планировании траектории в слайсере.

2.4 Выводы по главе 2

1. Охарактеризованы факторное пространство и объект исследования, в качестве которого принят технологический процесс строительной 3D-печати, включая проектную (моделирование и программирование) и технологическую стадии (экструзию и послойную укладку смеси). Предмет исследований - методы и средства контроля и управления процессом строительной 3D-печати, включая моделирование устойчивости 3D-печатных структур на проектной стадии, методы контроля и регулирования процесса на технологической стадии.

2. Для выявления взаимосвязи между свойствами смесей и режимами процесса 3D-печати планируется выполнить комплекс исследований, включающий:

- изучение реологического поведения смесей методами сдвиговой и сдвигающей реометрии;
- экспериментальную отработку режимов печати на лабораторном 3D-принтере с использованием смесей, различающихся по реологическому поведению;
- численное моделирование процесса 3D-печати в ПК ANSYS Fluent и экспериментальную верификацию его результатов с оценкой качества экструзионного слоя.

На основе полученных данных планируется установить рациональную модель реологического поведения и граничные значения реологических характеристик смесей, обеспечивающих стабильное качество и устойчивость 3D-печатных объектов.

3. Для определения требований к параметрам контроля и диапазону регулирования технологических характеристик смесей для 3D-печати планируется:

- разработка и апробация прибора для оперативного контроля технологичности смеси для 3D-печати по показателю пластической прочности;
- определение требований к значениям пластической прочности готовой к употреблению смеси для 3D-печати как комплексному критерию оценки технологичности смеси на основании оценки качества экструзионного слоя и

устойчивости модельных печатных объектов, прочностных характеристик 3D-печатных композитов.

4. Для определения требований к параметрам контроля и диапазону регулирования технологических режимов 3D-печати планируется:

- установить корреляционную взаимосвязь между значениями реологического (оценки предела текучести при сдвливании $K_i(I)$) и технологического (пластической прочности $P_{пл}$) параметров оценки пластичности смесей;

- определить точку оперативного контроля показателя технологичности смеси для 3D-печати;

- установить требования к технологическим режимам 3D-печати в зависимости от характеристик смеси на основании анализа данных, численного и физического экспериментов.

5. Методы и средства контроля и управления процессом строительной 3D-печати планируется обосновать по результатам промышленной апробации на основании комплексной оценки качества полноразмерных 3D-печатных изделий.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Определений исходных требований к параметрам процесса 3D-печати

3.1.1 Исследование моделей реологического поведения вязко-пластичных цементных смесей

На рисунке 3.1 представлены полные реологические кривые (зависимости эффективной вязкости η от напряжения сдвига τ) для трёх типов модельных цементных систем.

По результатам исследований выделено три типа моделей реологического поведения.

Система Ц - В (рисунок 3.1 а) квалифицируется как жёсткая, для неё характерны высокие значения вязкости в области малых напряжений сдвига (η достигает 800-900 Па·с при $\tau < 100$ Па) и резкое падение вязкости до 200-300 Па·с при увеличении τ до 400-500 Па.

Система Ц - В - СП (рисунок 3.1 б) обладает текучестью: вязкость остаётся низкой во всём диапазоне напряжений сдвига - максимальное значение составляет около 35-40 Па·с при $\tau \approx 50$ Па, затем снижается до 5-10 Па·с при $\tau = 250-300$ Па.

Система Ц - В - СП - МКЛ (рисунок 3.1 в) характеризуется как пластичная. Начальная вязкость составляет 300-350 Па·с при напряжениях сдвига до 200 Па, после чего наблюдается плавное снижение до 50-100 Па·с в области $\tau = 800-1000$ Па.

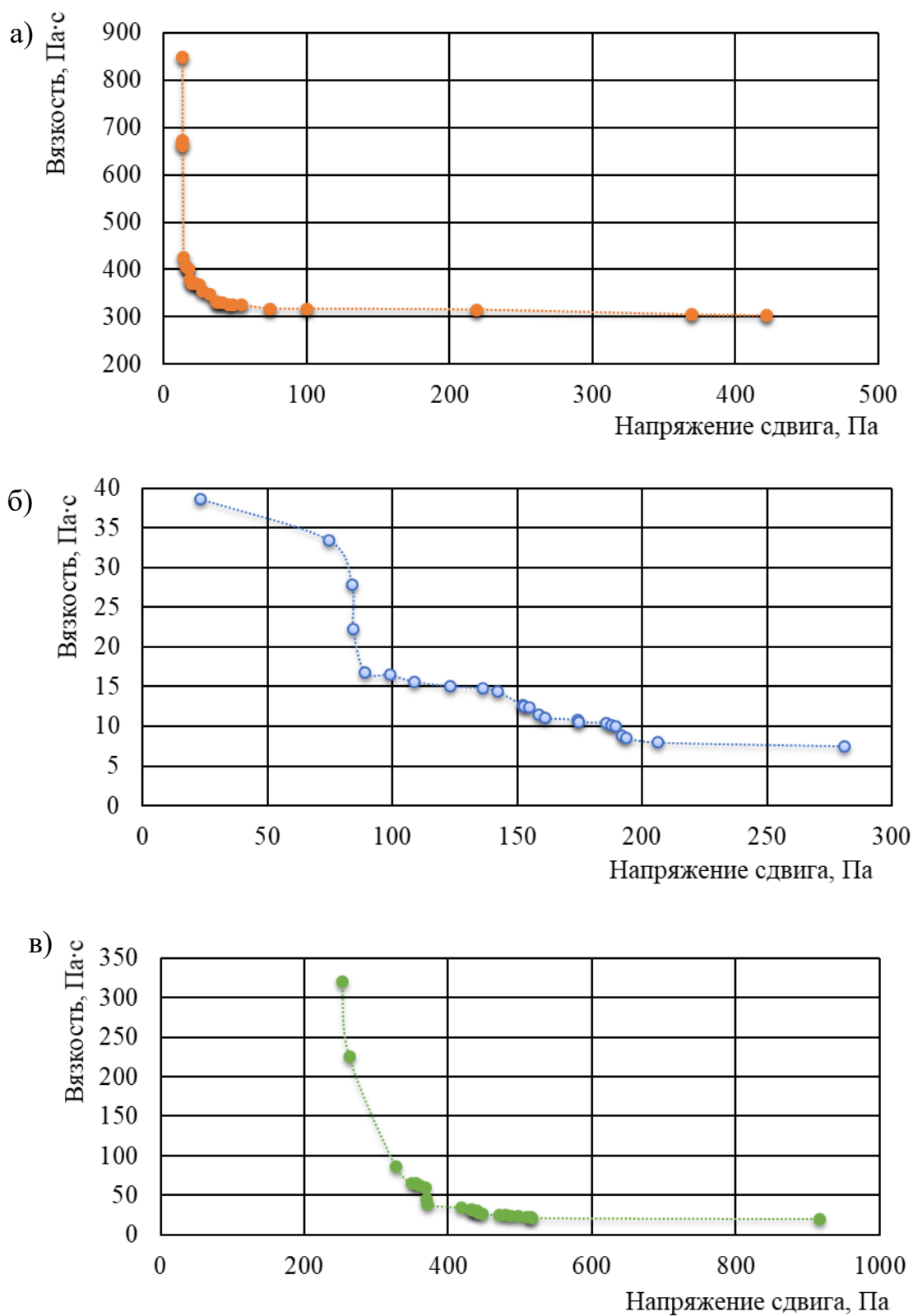


Рисунок 3.1 – Полные реологические кривые цементных систем:
 а) жесткая (Ц - В), б) текучая (Ц - В - СП), в) пластичная
 (Ц - В - СП - МКЛ)

Количественные реологические параметры, полученные методом сдвиговой реометрии, представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Реологические характеристики цементных смесей

Характеристики	Обозначение смеси		
	Жесткая	Текучая	Пластичная
Статическая вязкость η_0 , Па·с	847,3	38,6	320,0
Динамическая вязкость η , Па·с	302,7	7,46	2,42
Эффективная вязкость η^* , Па·с	350,0	15,1	225,1
Статический предел текучести $\tau_{к1}$, Па	13,1	23,3	252,6
Предел текучести $\tau_{к2}$ (по Бингаму), Па	31,9	89,1	271,3

3.1.2 Исследование взаимосвязи между моделью реологического поведения и качеством 3D-печатных объектов

Для реализации поставленных задач исследования был разработан и изготовлен лабораторный прототип строительного 3D-принтера, обеспечивающий возможность работы с высоковязкими, низкотекучими смесями (см. Прил. Б).

Разработанный лабораторный прототип включает (рисунок 3.2):

- 1) порталную систему позиционирования;
- 2) систему подачи высоковязких смесей;
- 3) систему управления подачей и экструзией.

Система позиционирования включает несущую раму из алюминиевых профилей, которая перемещается по модульным рельсам. Рама оснащена балкой, на которой размещена каретка экструдера. Системы перемещения балки и каретки экструдера по вертикали и горизонтали - винтовые. Разработанный лабораторный прототип отличается возможностью доукомплектования дополнительным оборудованием (заглаживающим устройством).

Комплексная система подачи и экструзии является ключевой особенностью разработки. Она позволяет подавать высоковязкие смеси (с пределом текучести до 3-5 кПа), доуплотнять смесь в экструдере для формирования бездефектного слоя.

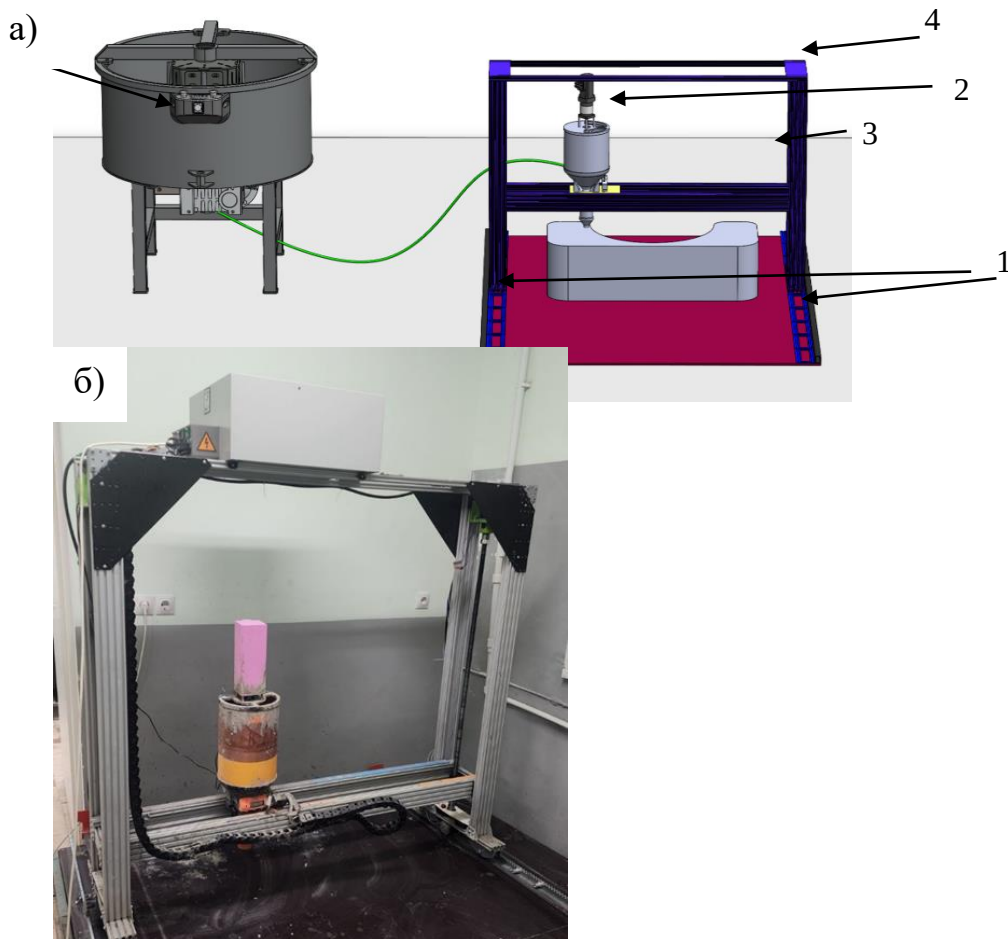


Рисунок 3.2 – Схема (а) и фото (б) лабораторной модели 3D-принтера
 Обозначено: 1 - направляющие рельсы, 2 - экструдер, 3 - балка
 перемещения по вертикальной оси, 4 - несущая рама, 5 - механизм
 подачи смеси.

Шнековая система подачи (рисунок 3.3 а) включает бункер-накопитель смесей объемом до 20 кг, подающий шнек диаметром 86 мм и длиной 1250 мм, управляемый электроникой электродвигатель, понижающий редуктор червячного типа с соотношением 1/10 с выходной скоростью 40-120 об/мин. Система оснащена модулем управления для регулирования скорости вращения и давления в системе.

Экструдерная головка (рисунок 3.3 б) состоит из емкости-накопителя объемом до трех килограмм, подающего шнека диаметром 40 мм и длиной 150 мм, сменных сопел различного размера и конфигурации выходного отверстия (3 круглых и 3 квадратных сопла, $d = 10, 20, 30$ мм) и шагового биполярного двигателя с одним валом, с возможностью варьирования скорости

вращения от 60 до 200 об/мин. Работа системы подачи синхронизирована с работой экструдера.

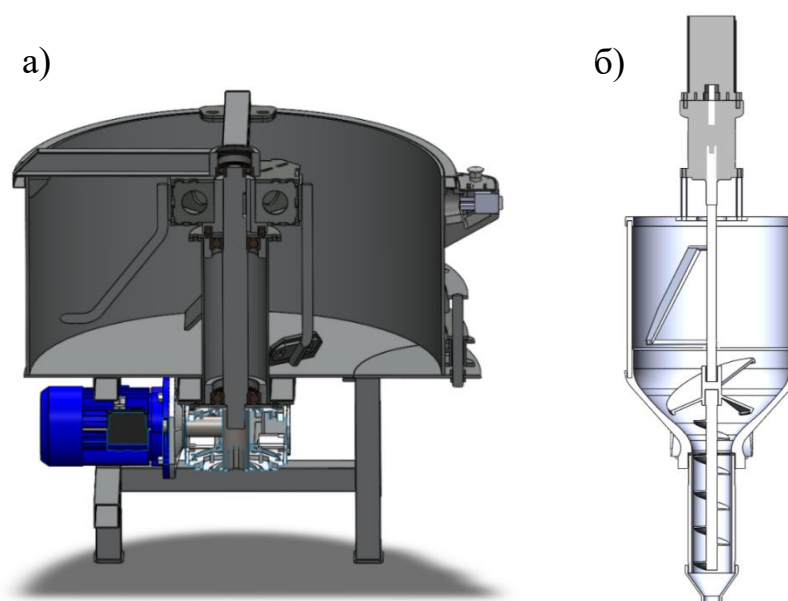


Рисунок 3.3 – Схемы системы подачи и экструзии 3D-принтера:
а) устройство системы подачи; б) экструзионная голова с промежуточной емкостью

Система управления состоит из электронного блока и управляемых электромоторов и отличается наличием синхронных режимов подачи и экструзии, возможностью регулировать данные режимы в зависимости от вязкости и текучести смесей. Электронный блок управления включает плату управления на 32-х битном процессоре с выносными драйверами для шаговых электромоторов; сенсорный дисплей с возможностью автономной работы всего комплекса; блок питания для обеспечения необходимого напряжения для работы комплекса; датчик для считывания скорости вращения электромотора; регулятор скорости вращения электромотора с возможностью автоматического удержания заданной скорости вращения с учетом нагрузок.

Для управления 3D-принтером используются слайсеры с открытым исходным кодом, такие как: PrusaSlicer, SuperSlicer, Cura. Преимущества использования данных продуктов заключается в том, что они имеют множественную настройку параметров печати, но к минусам относится то, что они в первую очередь адаптированы для печати пластиковым материалом.

По результатам экспериментов, включавших печать модельных элементов при фиксированной скорости вращения шнека (35 об/мин), выполнено сравнение результатов печати тремя типами смесей, различающихся реологическим поведением (см. рис. 3.1.). Для жесткой смеси Ц - В (рисунок 3.4) экструзионные слои отличаются дефектностью, разрывами и изменением геометрии. Это обусловлено сочетанием высокой статической вязкости ($847 \text{ Па}\cdot\text{с}$) и низкого предела текучести ($\tau_{к2} = 31,9 \text{ Па}$). Уже для начальных слоев характерно нарушение геометрии и разрывы, а к концу печати дефекты накапливаются. Формирование сплошного контура становится невозможным. Материал не способен сохранять заданную форму.

Смесь высокой текучести Ц - В - СП (рисунок 3.5) на начальном этапе демонстрирует ровную экструзию благодаря низкой вязкости ($\eta_0 = 38,6 \text{ Па}\cdot\text{с}$), однако после укладки нескольких слоёв развивается прогрессирующее оплывание и расплывание слоёв. Это определяется низким значением статического предела текучести $\tau_{к1} = 23,3 \text{ Па}$.

Пластичная смесь Ц - В - СП - МКЛ (рисунок 3.6) на всём протяжении печати сохраняет стабильную форму, отсутствие разрывов и оплывания слоев. Реологические характеристики данной системы (статическая вязкость $\eta_0 = 320 \text{ Па}\cdot\text{с}$, предел текучести $\tau_{к1} = 252,6 \text{ Па}$) обеспечивают баланс между экструзируемостью и формоустойчивостью, то есть определяют ее пригодность для экструзионной безопалубочной 3D-печати.

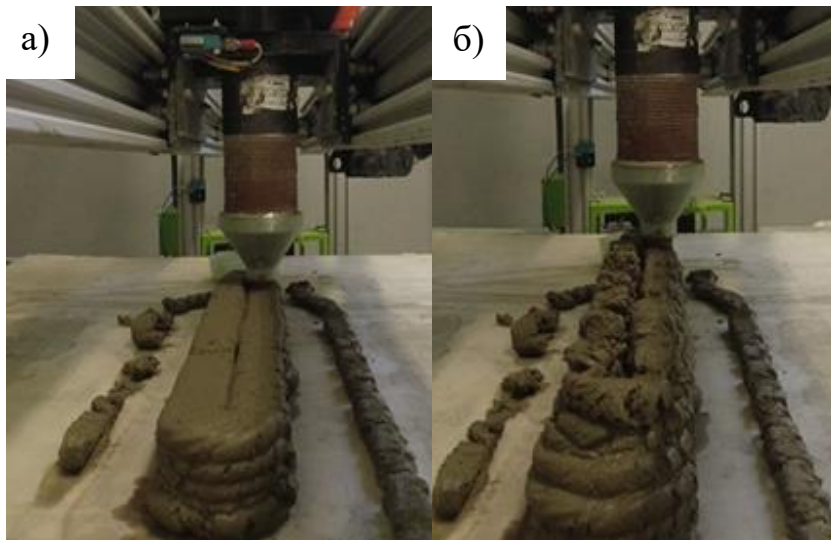


Рисунок 3.4 – Результаты 3D-печати модельного элемента с использованием жесткой смеси (Ц - В): а) начало печати; б) конец печати

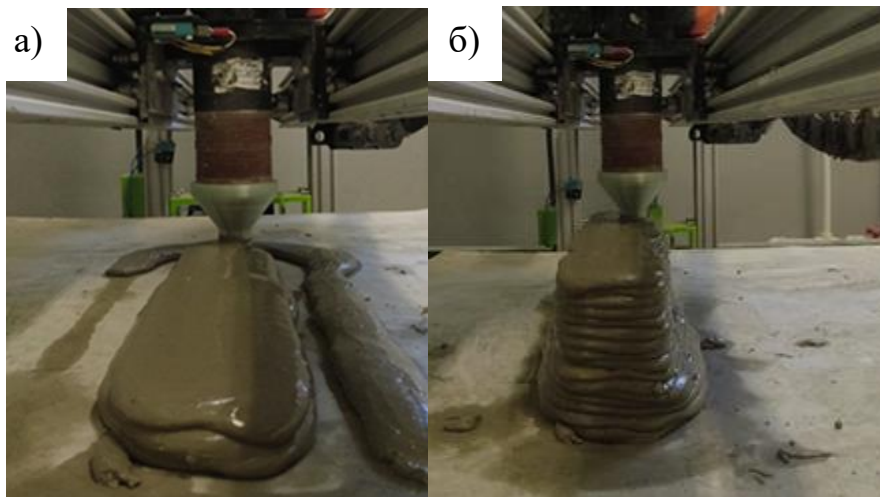


Рисунок 3.5 – Результаты 3D-печати модельного элемента с использованием текучей смеси (Ц - В - СП): а) начало печати; б) конец печати

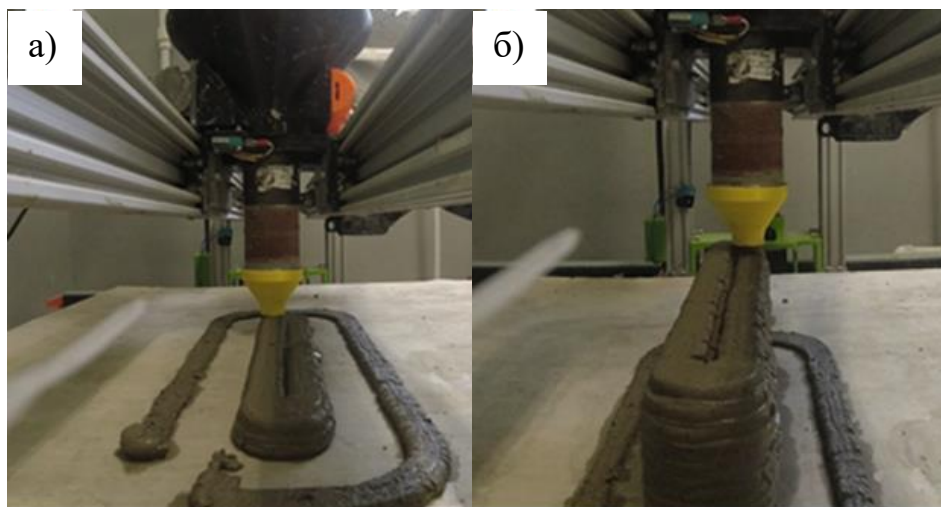


Рисунок 3.6 – Результаты 3D-печати модельного элемента с использованием пластичной смеси (Ц - В - СП - МКЛ): а) начало печати; б) конец печати

На основании этого модель реологического поведения и значения реологических характеристик пластичной смеси (Ц - В - СП - МКЛ) (см. табл. 3.1) использованы как исходные данные для численного моделирования процесса 3D-печати.

3.1.3 Установление взаимосвязи между моделями реологического поведения смесей для 3D-печати при сдвиге и сдавливании

В рамках теории течения при сдавливании (squeeze flow theory) J. Engmann'ом [115-117] произведен анализ механизмов течения материала в условиях сжатия между двумя параллельными пластинами. В результате авторами работ [118-121] проанализированы аналитические соотношения между нормальными напряжениями σ_{xx} , скоростью сжатия и классическими показателями пределов текучести и вязкости систем при действии тангенциальных напряжений сдвига τ в рамках различных реологических моделей. В результате анализа данных моделей для вязких, пластичных, вязко-пластичных, эластичных и вязко-эластичных материалов были обоснованы условия их текучести при сжатии, позволяющие связать классические реологические характеристики с параметрами действия сжимающих напряжений.

В данной работе результаты реометрических испытаний исследованных смесей для оценки их основных реологических характеристик интерпретируются с использованием базового соотношения между оценкой предела пластичности при сдавливании K_I и пределом текучести τ при простом сдвиге, полученного J. Engmann'ом с использованием модели Хершеля-Балкли [122-126]:

$$F = (\sqrt{3}\tau_y \left(\frac{H_0}{H}\right) - 3K \frac{\dot{H}H_0}{H^2})A_0, \quad (3.1)$$

где H - расстояние между пластинами, H_0 - начальное расстояние между пластинами, $\dot{H}$ - скорость движения пластин (относительно друг друга),

K - коэффициент консистенции степенного закона, τ_y - предел текучести, A_0 - начальная площадь контакта.

Уравнение (3.1) позволяет реализовать прямой и обратный переход между данными сдвиговой и сдавливающей реометрии без использования дополнительного оборудования. Установленная взаимосвязь и предложенная методика пересчёта позволяют:

1) получать недостающие технологические параметры сжатия непосредственно из стандартных сдвиговых измерений, исключая необходимость в сложной оснастке для сдавливающей реометрии на этапе подбора состава;

2) контролировать реологическое качество смеси в реальном времени по сигналам датчиков силы и перемещения формовочного оборудования, вычисляя текущие τ_y и K ;

3) масштабировать результаты численного моделирования, выполненного для модельной системы, на новые составы того же класса с помощью простых эмпирических коэффициентов, определяемых из соотношения их сдвиговых характеристик или пределов пластичности при сдавливании.

Анализ кривых сдвиговой реометрии (рисунок 3.7) показывает, что готовые к употреблению смеси (системы Ц - В - СП - МКЛ - ИМ и Ц - В - СП - МКЛ - П) характеризуются идентичной формой зависимостей вязкости от напряжения сдвига: резкое падение вязкости в области 0-100 Па. Такое поведение типично для систем с выраженным пределом текучести и может описываться моделью Хершеля-Балкли, как и модельная пластичная система Ц - В - СП - МКЛ.

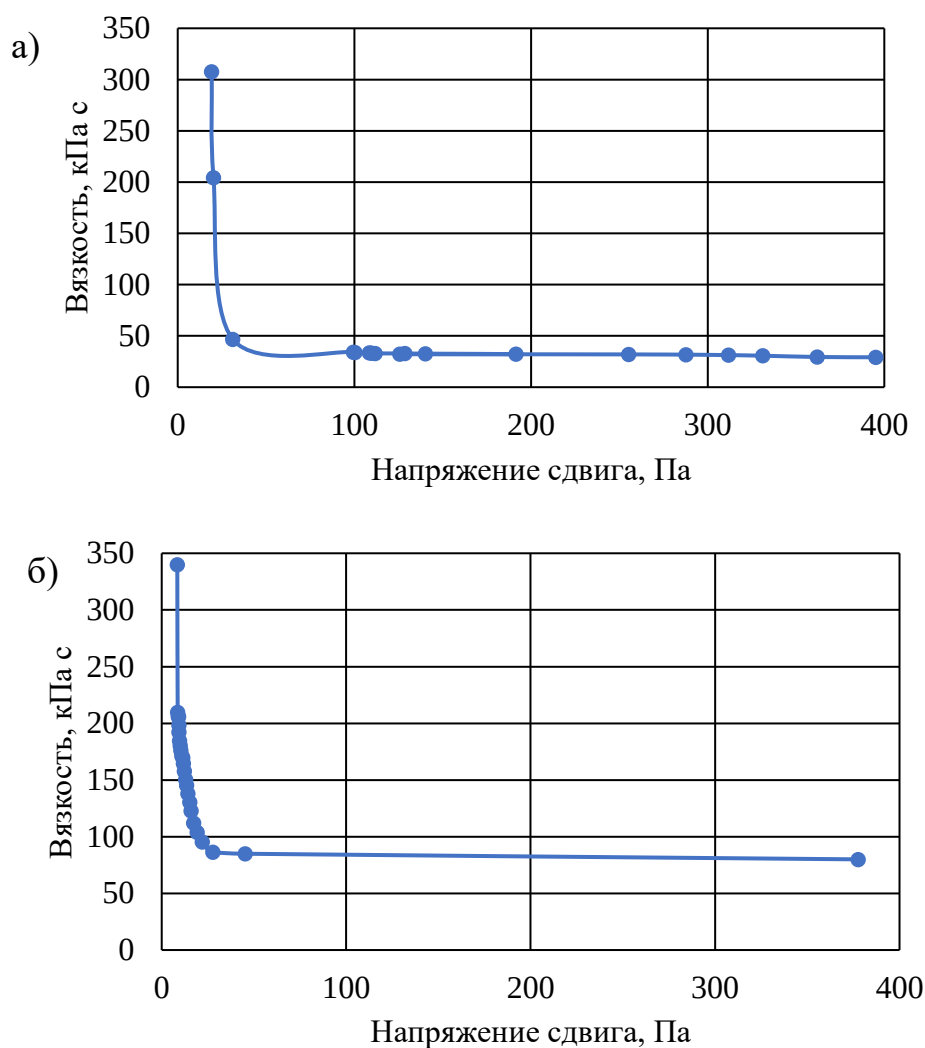


Рисунок 3.7 – Результаты сдвиговой реометрии для систем:
а) Ц – В – СП – МКЛ - ИМ, б) система Ц – В – СП – МКЛ - П

Кривые сдвигающей реометрии для трёх систем (рисунок 3.8) имеют характер течения при сдвиге, сходный с течением при сдвиге. Фиксируется зона устойчивости соответствующая преодолению начального предела пластичности, зона течения с интенсивно разрушаемой структурой, соответствующая зоне переменной вязкости на кривых сдвиговой реометрии.

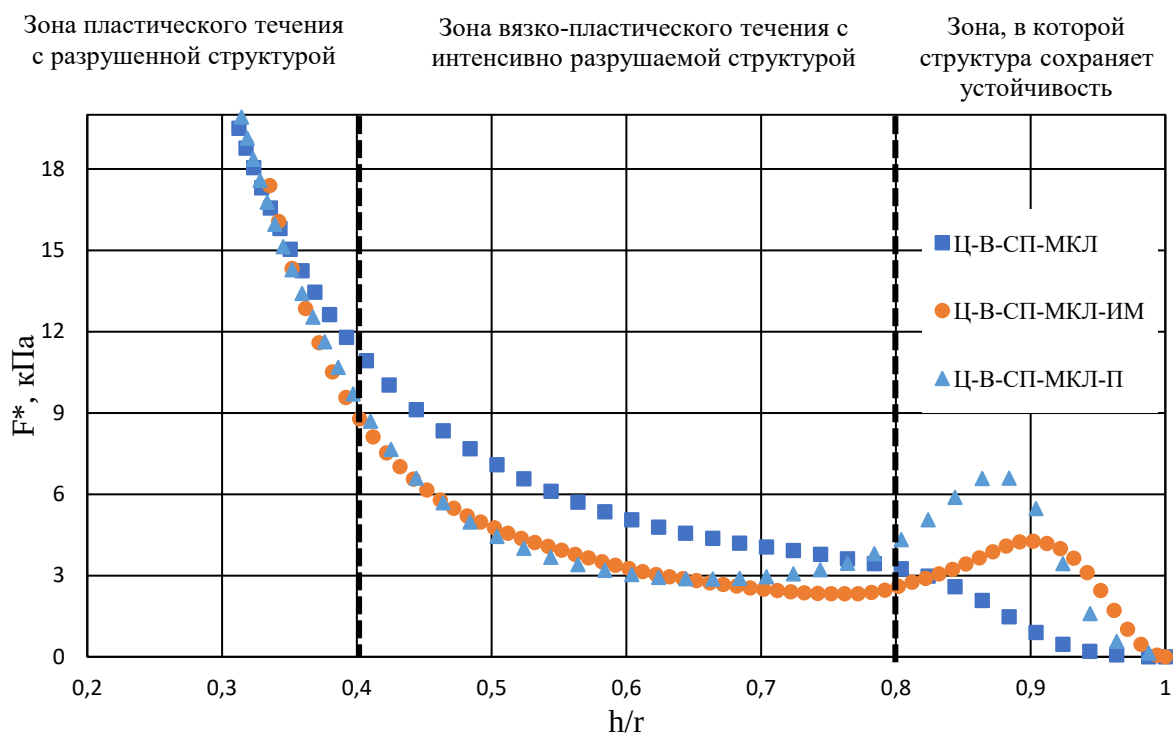


Рисунок 3.8 – Результаты сдвливающей реометрии цементных систем

Таблица 3.2 – Соотношение значений реологических характеристик смесей при сдвиге и сдвливании

Характеристики	Тип смеси		
	Ц - В - СП - МКЛ	Микрозернистая, патент RU 2729283 C1 (Ц - В - СП- МКЛ- ИМ)	Мелкозернистая, патент RU 2729085 C1(Ц - В - СП - МКЛ - П)
Реологические характеристики (при сдвиге)			
Статическая вязкость η_0 , Па·с	320,0	307,63	340,7
Динамическая вязкость η , кПа·с	20,42	29,45	79,1
Статический предел текучести τ_{k1} , Па	252,6	246,1	259,9
Предел текучести τ_{k2} (по Бингаму), Па	87,6	46,9	27,9
Оценка предела пластичности. (при сдвливании) $K_i(I)$, кПа	2,2	1,74	1,98

Сопоставление значений τ_y и K_I в таблице 3.2 показывает соответствие между пределом текучести при сдвиге и оценкой предела пластичности при сдвливании. Это означает, что смеси, готовые к употреблению (системы Ц - В - СП - МКЛ - П и Ц - В - СП - МКЛ - ИМ) по своему реологическому поведению

в условиях сдвливания максимально близки к модельной системе Ц - В - СП - МКЛ. Следовательно, модели их реологического поведения могут быть без принципиальных изменений использоваться для численного моделирования.

3.1.4 Численное моделирование процесса 3D-печати

Целью моделирования является установление граничных требований к параметрам процесса печати (скоростью подачи материала, скоростью перемещения сопла, высотой слоя) в соответствии с реологическими характеристиками смеси, определяющими качество и устойчивость формируемых структур.

В качестве исходных данных для моделирования использовалась модель Хершеля-Балкли, экспериментальные данные сдвиговой реометрии (Data). Диапазон варьирования входных данных для моделирования представлен в таблице 3.3. Основанием для выбора модели Хершеля-Балкли послужили следующие соображения. Для адекватного описания течения пластичной цементной системы в условиях, характерных для 3D-печати необходима модель, пригодная как для низких скоростей деформации в зоне формирования слоя, так и для высоких скоростей сдвига в сопле. Численные эксперименты показали, что наиболее подходящей является модель Хершеля-Балкли, описываемая уравнением:

$$\tau = \tau_0 + K * \dot{\gamma}_n \quad (3.2)$$

где τ - напряжение сдвига, Па; τ_0 - предел текучести, Па; K - коэффициент консистенции, Па·сⁿ; $\dot{\gamma}$ - скорость деформации сдвига, с⁻¹; n - показатель нелинейности течения (индекс текучести).

Модель Хершеля-Балкли (рисунок 3.9) описывает течение вязко-пластических жидкостей следующим образом. При низких скоростях деформации ($\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_{crit}$) материал ведет себя как высоковязкая жидкость с вязкостью μ_0 . По мере увеличения скорости деформации (сдвига), когда предел текучести τ_0 преодолевается, поведение жидкости описывается степенным законом.

Таблица 3.3 – Исходные данные для моделирования

Экспериментальные данные (Data)		Параметры модели Хершеля-Балкли (НВ)	
Характеристики смеси	Значения	Наименование	Диапазон варьирования
Статическая вязкость η_0 , Па·с	320,0	Предел текучести τ_0 , Па	200-600
Динамическая вязкость η , Па·с	2,42		
Эффективная вязкость η^* , Па·с	225,1	Коэффициент вязкости K , Па·с ⁿ	20-250
Статический предел текучести τ_{k1} , Па	252,6	Индекс степенного закона n	0,3-0,75
Предел текучести τ_{k2} (по Бингаму), Па	271,3		

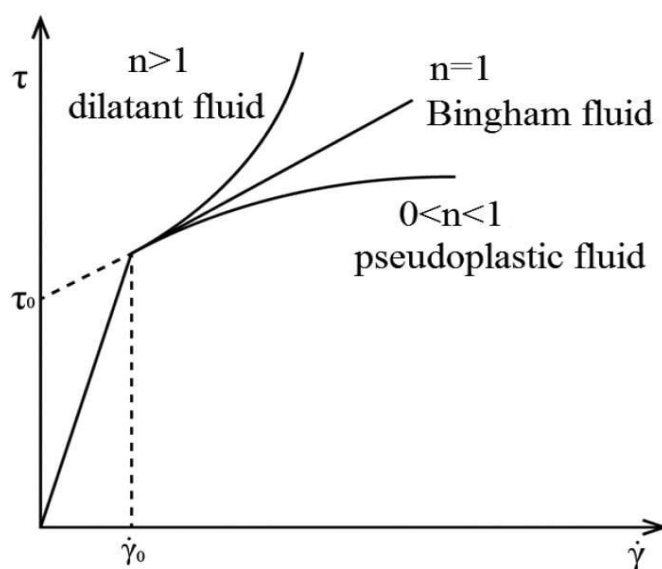


Рисунок 3.9 – Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига согласно модели Хершеля-Балкли

На рисунке 3.10 представлен пример аппроксимации экспериментальной зависимости вязкости пластичной системы от скорости деформации моделью Хершеля-Балкли, реализованной в вычислительной среде ANSYS FLUENT. Высокое совпадение опытных данных и модельной кривой в диапазоне скоростей деформации от 0 до 25 с⁻¹ подтверждает применимость выбранного реологического закона.

Параметры модели (τ_0 , K , n) определялись нелинейной регрессией по данным сдвиговой реометрии.

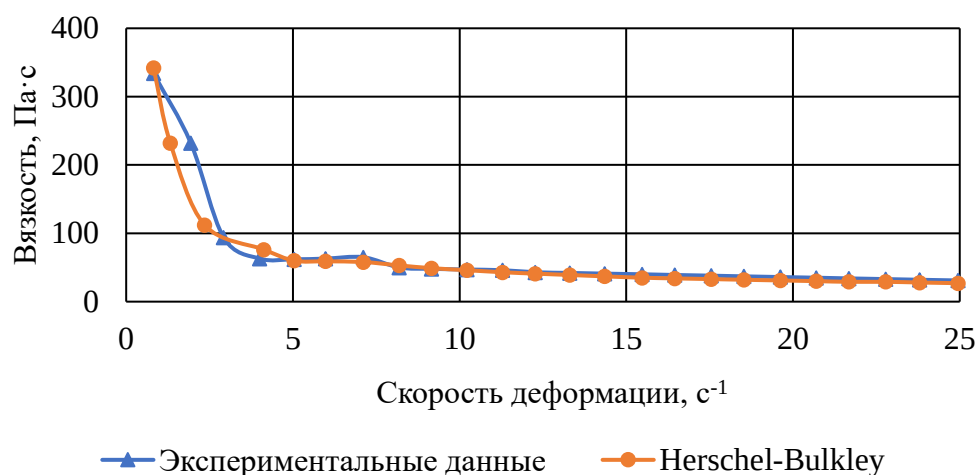


Рисунок 3.10 – Аппроксимация зависимости вязкости смеси от скорости деформации (пластичная система)

С целью верификации разработанной методики и оценки её прогностической способности выполнено моделирование укладки одиночных слоёв и многослойных структур с использованием модели Хершеля-Балкли. Параметры модели приняты следующими: предел текучести $\tau_0 = 251 \text{ Па}$, коэффициент консистенции $K = 20 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$, показатель нелинейности $n = 0,75$, критическая скорость деформации $\gamma_{\text{crit}} = 0,01 \text{ с}^{-1}$.

Печать образцов осуществлялась с использованием двух типов сменных сопел (рисунок 3.11): круглого диаметром 20 мм (а) и прямоугольного размерами $45 \times 15 \text{ мм}$ (б). В ходе экспериментов поддерживались постоянными: скорость экструзии - 15 мм/с, скорость перемещения сопла - 10 мм/с, длина образцов - 300 мм. Высота укладки слоя варьировалась на двух уровнях: 20 мм и 25 мм.

Расчёты проводились для четырёх конфигураций, различавшихся формой сопла и высотой укладываемого слоя. Общий вид полученных однослойных образцов представлен на рисунках 3.12 и 3.13: для круглого сопла - высота слоя 20 мм (рисунок 3.12 а) и 25 мм (рисунок 3.12 б); для прямоугольного сопла — высота слоя 20 мм (рисунок 3.13 а) и 25 мм (рисунок 3.13 б).

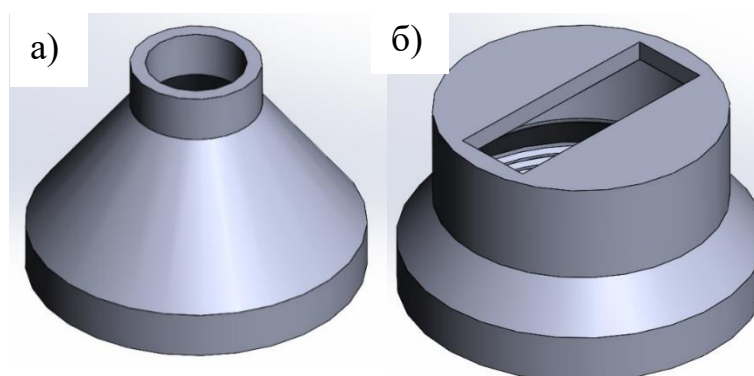


Рисунок 3.11 – Сменные сопла, использованные при печати образцов:
а) круглое диаметром 20 мм, б) прямоугольное 45 × 15 мм

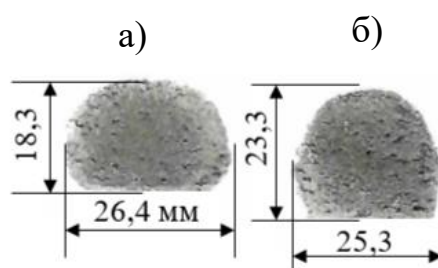


Рисунок 3.12 – Общий вид однослойных образцов, напечатанных
круглым соплом: а) высота печатного слоя 20 мм,
б) высота печатаемого слоя 25 мм

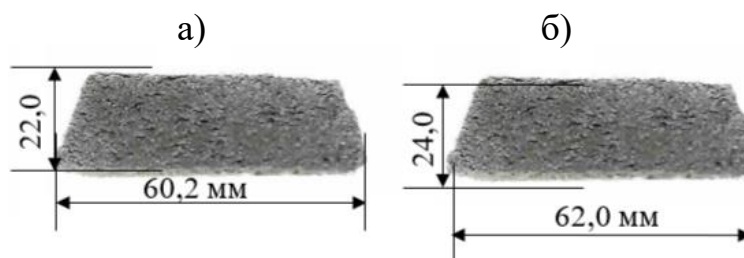


Рисунок 3.13 – Общий вид однослойных образцов, напечатанных
прямоугольным соплом: а) высота печатного слоя 20 мм,
б) высота печатаемого слоя 25 мм

Сравнение расчётных профилей слоев (рисунок 3.14), полученных с использованием модели Хершеля-Балкли с экспериментальным сканом образца демонстрирует качественное совпадение геометрии: модель адекватно воспроизводит характерную форму слоя на боковых поверхностях. Количественная оценка точности моделирования показала, что расчётная толщина одиночного слоя

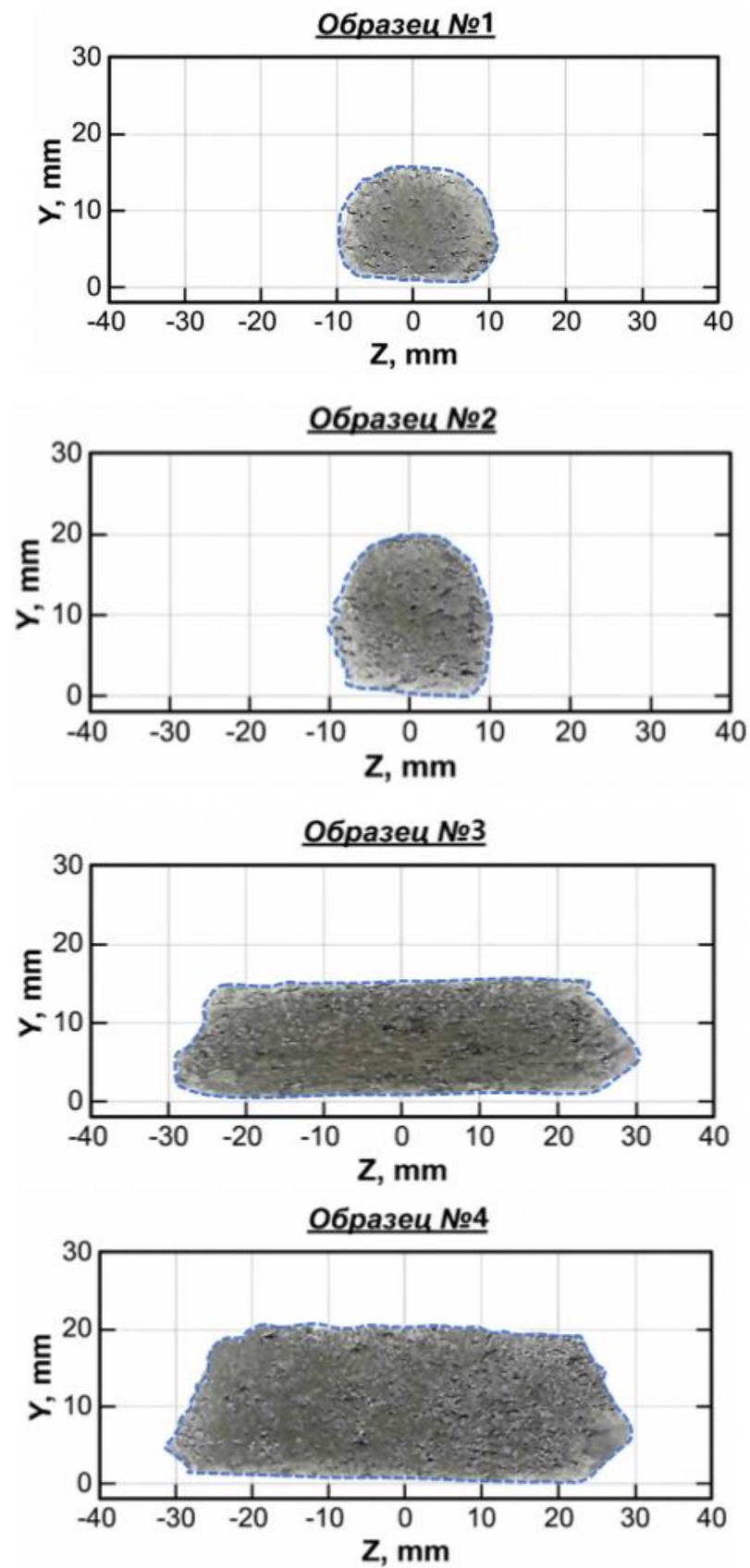


Рисунок 3.14 – Сопоставление расчетной и экспериментальной формы поперечного сечения слоя

занижена относительно эксперимента в пределах от 3% до 9%. Данная погрешность является приемлемой для инженерных расчётов и может быть учтена при прогнозировании общей высоты многослойной конструкции. Результаты численной симуляции последовательной укладки четырёх слоёв (рисунок 3.15) демонстрируют, что модель Хершеля-Балкли позволяет адекватно прогнозировать устойчивость и изменение профиля многослойной структуры. Расчётная форма слоёв и их деформация под действием собственного веса качественно согласуются с экспериментом.

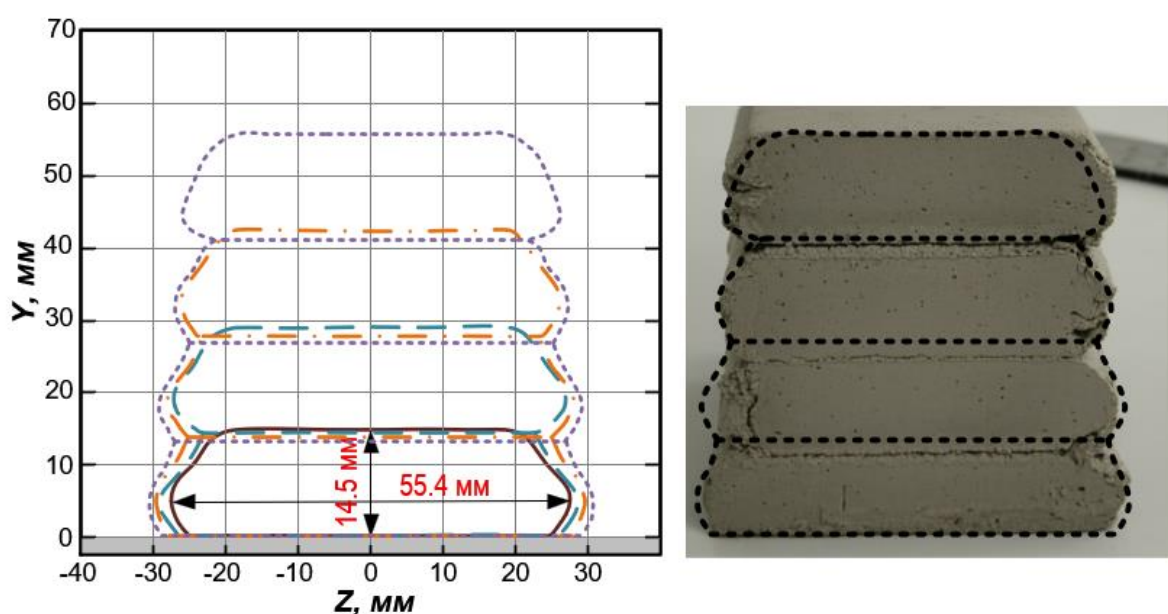


Рисунок 3.15 – Численная симуляция изменения профиля слоев при печати 4 слоев

Таким образом, проведённые численные эксперименты доказали, что реологическая модель Хершеля-Балкли обеспечивает достоверное прогнозирование геометрии печатных слоёв. Полученное расхождение по толщине слоя в пределах 3-9% позволяет рекомендовать данную модель для практических инженерных расчётов технологических режимов, а также для интеграции в системы автоматизированного управления процессом формования конструкций.

Обобщённые критерии устойчивости 3D-печатных структур, установленные по результатам численного моделирования, представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Диапазон характеристик смеси и параметров процесса, обеспечивающих устойчивость 3D-печатных структур

<i>Входные реологические параметры смеси для численного моделирования</i>	
Предел текучести τ_0 , Па	200-600
Индекс степенного закона n	0,3-0,75
Критическая скорость дформации	0,001-0,05
Коэффициент вязкости K , Па·с ⁿ	25-250
<i>Параметры процесса</i>	
$D_{\text{сопла}}$, мм	10-25
Скорость подачи материала U , см ³ /с	10-25
Скорость движения сопла V , мм/с	10-30
Параметр относительной скорости перемещения сопла V/U	1,0-1,5
Относительная высота расположения сопла над подложкой (доля от высоты слоя)	0,95-1,1

3.2 Обоснование комплексного критерия оценки технологичности смесей для 3D-печати

3.2.1 Разработка прибора для оперативного контроля пластичности смесей для 3D-печати

Разработка прибора производилась с целью обеспечения достоверного оперативного контроля технологических свойств неорганических строительных смесей для строительной 3D-печати.

В основу положен принцип действия грунтового пенетromетра, реализующего метод оценки пластичности через сопротивление внедрению индентора. Однако в отличие от стандартных приборов, оснащенных цилиндрическим плунжером, разрабатываемое устройство наследует кинематическую схему и физическую модель традиционного пластометра конструкции МГУ (конусный метод Ребиндера).

Техническое обоснование необходимости разработки:

1. Несоответствие стандартного метода условиям нагружения. Анализ напряженно-деформированного состояния материала на стадиях экструзии и формирования слоя выявил, что в процессе 3D-печати смесь испытывает

комплексное воздействие касательных (сдвиговых) и нормальных (сдавливающих) напряжений.

2. Несоответствие схемы нагружения стандартного пенетromетра напряженно-деформированному состоянию материала в процессе 3D-печати. Используемый в стандартных приборах цилиндрический плунжер создает нормальные напряжения, величина которых не отражает вклад касательных (сдвиговых) напряжений, возникающих в экструзионной головке и межслоевом контакте. Это ограничивает точность и практическую значимость получаемых данных пластической прочности при прогнозировании технологического поведения смеси.

3. Корреляция метода с реальным процессом 3D-печати. Погружение конического индентора инициирует в исследуемой среде распределение напряжений, адекватное комбинации сдавливания и сдвига (см. табл. 2.8). Следовательно, измеряемый параметр - пластическая прочность ($P_{пл}$) - является универсальной характеристикой технологичности смеси, отражающей её способность сопротивляться как формоизменению под собственным весом, так и реологическому течению в экструдере.

Таким образом, разработка направлена на устранение методической погрешности измерений, вызванной применением цилиндрического индентора, и достижение технического результата - получения объективных данных о структурно-механическом барьере смеси, необходимых для прогнозирования устойчивости напечатанных конструкций и оптимизации параметров печати.

Для достижения указанного технического результата, заключающегося в повышении точности и информативности оперативного контроля реологических свойств строительных смесей, была разработана конструкция комбинированного прибора, объединяющая апробированные физические принципы конической пластометрии и цилиндрической пенетрации в едином портативном корпусе.

Конструкция устройства. Устройство (рисунок 3.16) состоит из корпуса (1), включающего верхнюю крышку (2) с дисплейным модулем (13), боковые

стенки (3) с кнопкой включения (6) и кнопкой сброса (7), внутреннюю несущую конструкцию (4) и защитный кожух (5). В защитном кожухе (5) размещён тензометрический датчик (8), жёстко закреплённый на несущей конструкции (4) и механически соединённый со штоком (9). На штоке (9) предусмотрено посадочное место для установки сменных измерительных насадок (10): конической (17) с углами при вершине 30° , 45° и 60° и цилиндрической плунжерной (18) с плоским торцом. В несущей конструкции (4) смонтированы: электронный блок управления (12) на микроконтроллере, плата обработки сигналов (11), плата контроллера заряда (14) с аккумуляторной батареей (15) и интерфейсный разъём питания и зарядки (16), выведенный на боковую поверхность корпуса. Дисплей (13) закреплён под прозрачной областью крышки (2) и характеризуется увеличенной плотностью пикселей, расширенными углами обзора и оптимизированной цветопередачей.

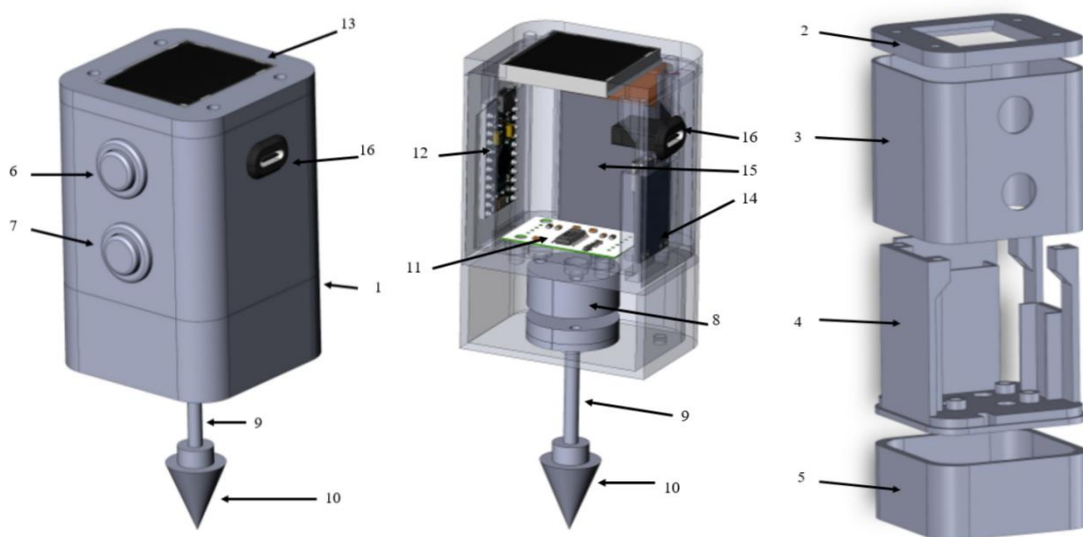


Рисунок 3.16 – Схема устройства авторского пластометра

1 - корпус; 2 - крышка дисплея; 3 - боковые стенки; 4 - несущая конструкция; 5 - защитный кожух; 6 - кнопка включения; 7 - кнопка сброса; 8 - тензометрический датчик усилия; 9 - шток; 10 - сменная измерительная насадка; 11 - плата обработки сигналов; 12 - электронный блок управления; 13 - дисплей; 14 - плата контроллера заряда; 15 - аккумуляторная батарея; 16 - разъём питания и зарядки; 17 - коническая насадка; 18 - цилиндрическая насадка-плунжер.

Внешний вид готового прибора в сборе представлен на рисунке 3.17.

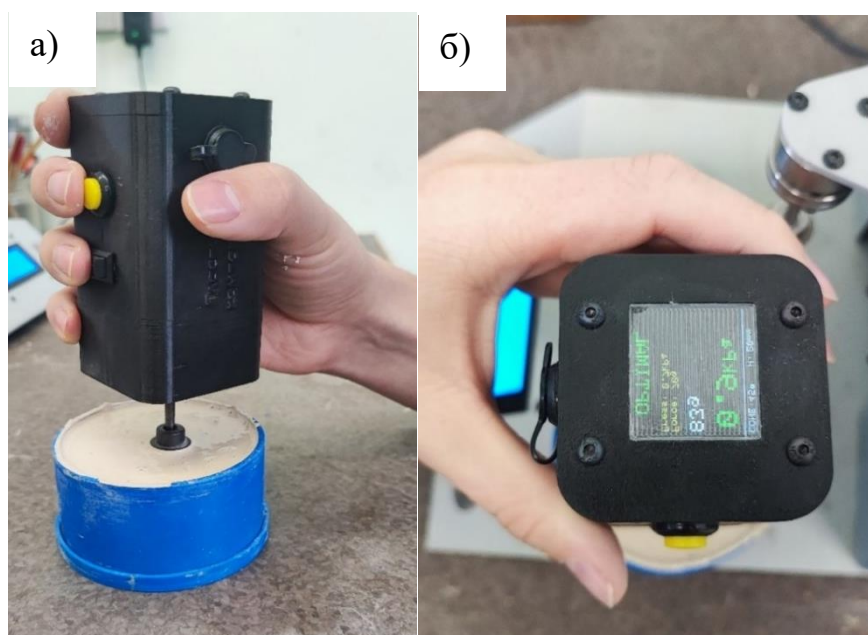


Рисунок 3.17 – Вид готового устройства а) вид сбоку, в) вид сверху

В завершающей стадии исследований на базе описанной конструкции был разработан и испытан лабораторный образец автоматизированной версии прибора (рисунок 3.18). В данной модификации реализован режим измерений, протекающий практически в автономном режиме без непосредственного участия оператора в процессе нагружения. Погружение измерительной насадки (10) в исследуемую среду осуществляется с постоянной скоростью, посредством привода на основе шагового двигателя, интегрированного в несущую конструкцию (4) и кинематически связанного со штоком (9). Применение шагового мотора исключает влияние человеческого фактора на скорость внедрения индентора и угол погружения, обеспечивая высокую воспроизводимость условий измерения и, как следствие, повышенную точность определения пластической прочности и показателей пенетрации. Электронный блок управления (12) в автоматизированной версии дополнительно реализует функции управления приводом.



Рисунок 3.18 – Вид готового устройства с автоматизированным управлением

Принцип действия. Функционирование устройства осуществляется в следующей последовательности. После активации прибора нажатием кнопки (6) оператор, используя кнопки управления (6, 7), производит выбор типа установленной сменной насадки (10) и, в случае применения конической насадки, значения угла при ее вершине (30° , 45° или 60°). Выбранные параметры определяют, какой набор тарировочных констант и какой алгоритм расчета будут задействованы вычислительной платой (12) в ходе измерений.

В процессе выполнения измерения шток (9) с зафиксированной на нем насадкой (10) внедряется в контролируемую среду (свежеприготовленную строительную смесь). Реакция среды на внедрение индентора создает осевое усилие сопротивления, которое через шток (9) передается на чувствительный элемент датчика усилия (8). Датчик (8) генерирует аналоговый электрический сигнал, амплитуда которого пропорциональна величине приложенной нагрузки. Данный сигнал поступает на вход платы обработки (11), где осуществляется его нормирование и преобразование в цифровую форму. Оцифрованный сигнал передается в блок управления (12).

Микропрограммное обеспечение блока управления (12) реализует расчетно-аналитический цикл. В рамках данного цикла блок управления вычисляет значение, полученное при измерении путем подстановки текущего значения усилия и известной глубины погружения в соответствующее вычислительное уравнение. При использовании конической насадки расчет выполняется по формуле:

$$P_m = K_a \times F / h_m^2 \quad (3.3)$$

где P_m – пластическая прочность, K_a - константа конуса, F - прилагаемое усилие, h_m - глубина погружения конуса.

Для расчетов с цилиндрическими насадками используется формула:

$$P_{пл} = \frac{4N}{\pi d^2} \quad (3.4)$$

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

Полученные расчетные значения сопоставляются блоком управления (12) с предустановленными пороговыми значениями и диапазонами, характеризующими технологическое состояние смеси. На дисплей (13) выводится текущее моментальное значение усилия (пиковое значение) и, при необходимости, диапазон пластичности смеси, что обеспечивает оператору возможность экспресс-оценки пригодности смеси к применению.

3.2.2 Верификация прибора для оперативного контроля пластичности смесей для 3D-печати

Оценка диапазона измерений. Результаты испытаний при различных температурах (+5, 25, 35 °C), соответствующих условиям построечной и заводской печати, представлены на графиках (рисунок 3.19). Анализ полученных зависимостей показывает, что разработанный прибор сохраняет работоспособность и обеспечивает корректные измерения при работе со смесями в широком

диапазоне температур от $+5^{\circ}\text{C}$ до $+35^{\circ}\text{C}$, что подтверждает его универсальность и применимость.

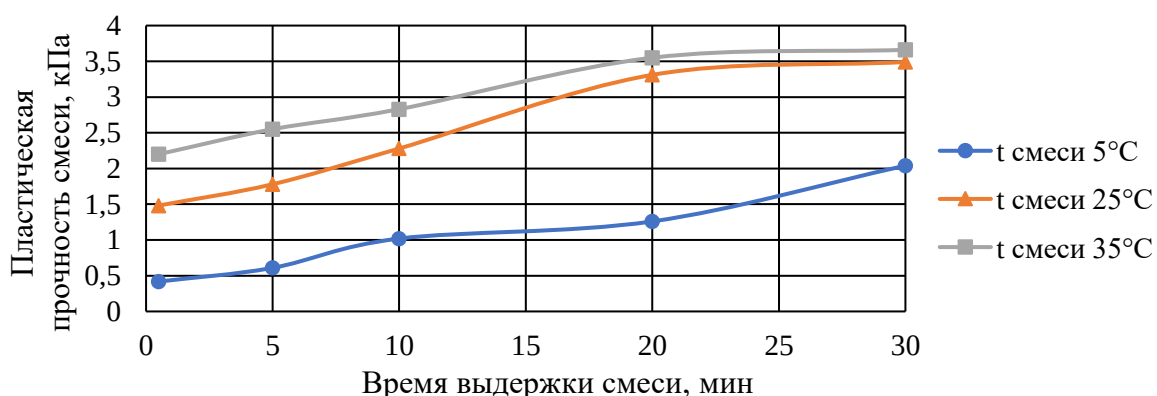


Рисунок 3.19 – Результаты контроля пластической прочности при варьировании технологических параметров печати (времени и температуры)

Количественный анализ кинетики набора прочности выявил следующие закономерности. При начальной температуре смеси 5°C стартовое значение пластической прочности составило 0,41 кПа, а конечное (через 30 мин) – 2,0 кПа. Для смеси, нагретой до 35°C , начальное значение достигало 2,2 кПа, а конечное – 3,7 кПа, что в 4,5 раза выше начального и в 1,5 раза выше конечного показателей по сравнению с холодной смесью. В условиях, приближенных к комнатным (25°C), начальная прочность составила 1,5 кПа, конечная – 3,5 кПа. Скорость роста пластической прочности в интервале 0-15 мин при температурах 25°C и 35°C превышала скорость при 5°C на 0,02 кПа/мин и 0,04 кПа/мин соответственно. После 20 минут выдержки прирост прочности для всех температурных режимов существенно замедлялся. Полученные данные свидетельствуют о том, что разработанный прибор позволяет уверенно регистрировать изменения пластической прочности в диапазоне $R_{\text{пл}} = 0,4\text{--}4,0$ кПа, что полностью перекрывает область технологически значимых состояний смеси для строительной 3D-печати.

Дополнительным подтверждением широкого диапазона и стабильности разработанного прибора служат результаты непрерывного мониторинга

кинетики набора пластической прочности смеси в течение всего периода её жизнеспособности (рисунок 3.20). На представленном графике отражено изменение контролируемого параметра во времени для образцов смеси, испытанных при различных начальных условиях. Анализ полученных кривых показывает, что прибор обеспечивает уверенное измерение пластической прочности в интервале от 0,4 кПа до значений, превышающих 4,0 кПа, во временном промежутке до 50 минут. Воспроизводимость формы кинетических зависимостей свидетельствуют о корректной работе измерительного прибора, во всём исследованном диапазоне нагрузок и температурных условий. Таким образом, подтверждена способность устройства функционировать в широком диапазоне изменения пластической прочности, характерном для полного технологического цикла использования строительных смесей для 3D-печати от момента приготовления до стадии потери экструдированности

Сравнительный анализ результатов, полученных разработанным прибором и эталонным пенетрометром. Сравнительные испытания проведены в соответствии с методикой первого этапа эксперимента. Результаты показали, что стандартный пенетрометр с плоским плунжером плохо регистрирует малые значения пластической прочности (ниже 1,0-1,2 кПа), характерные для свежеприготовленной смеси в первые минуты после затворения водой. В этой области его показания нестабильны, а иногда усилие оказывается ниже порога чувствительности механического динамометра, что не позволяет надёжно оценить начальную прочность - критически важный параметр для запуска экструзии и устойчивости первых слоёв при 3D-печати.

Разработанный прибор с конической насадкой и цифровым датчиком фиксирует пластическую прочность начиная с 0,4 кПа сразу после приготовления смеси, обеспечивая детальную картину набора прочности во всём временном диапазоне. Сравнение кинетических кривых, построенных по усреднённым данным двух приборов (рисунок 3.21), показывает высокую сходимость результатов в рабочей области (свыше 1,0-1,2 кПа). Чувствительность разработанного устройства к приросту прочности примерно в 2,4 раза выше,

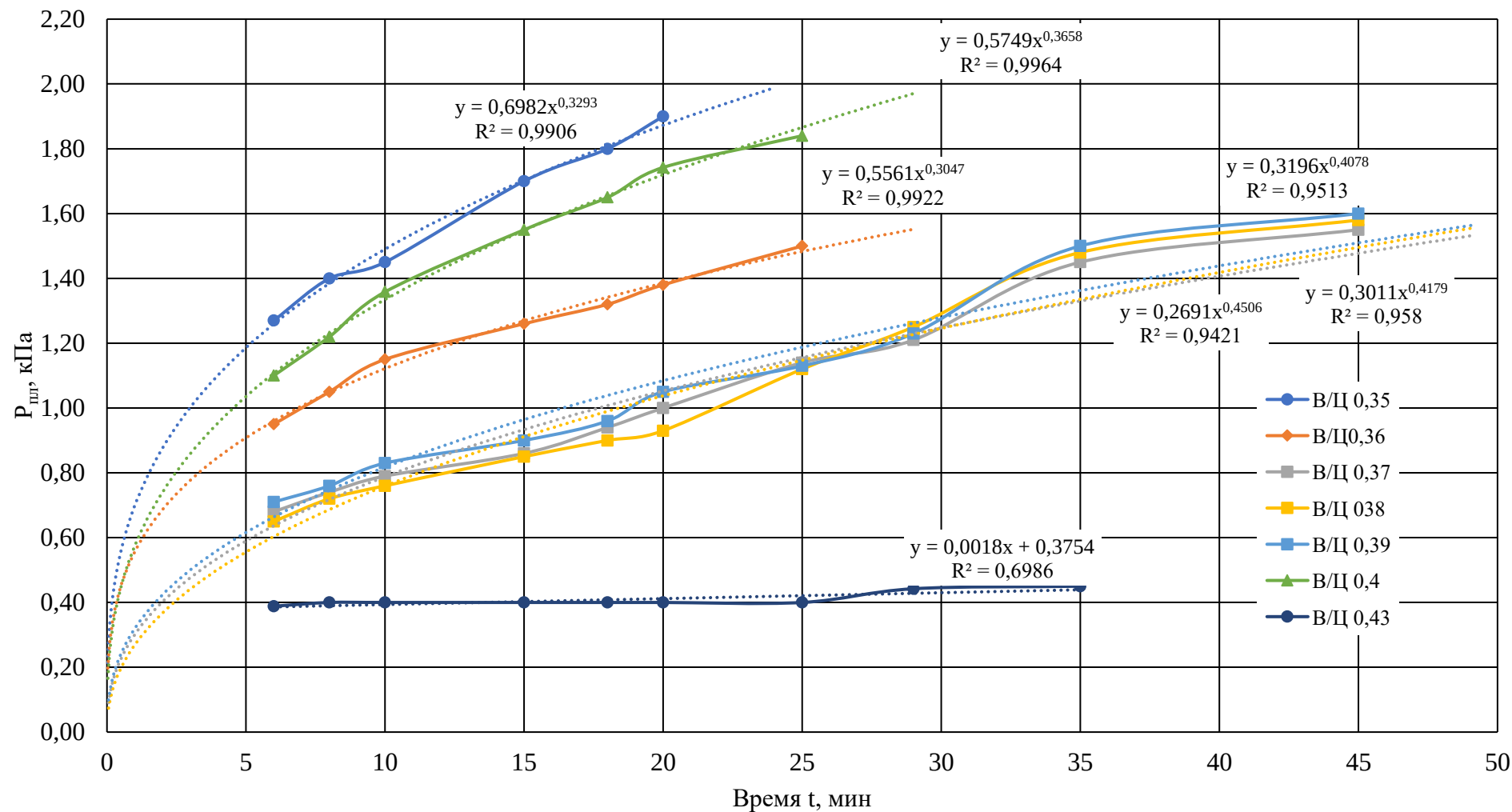


Рисунок 3.20 – Изучение закономерностей изменения пластической прочности цементной смеси во времени

что объясняется конструкцией индентора и точностью цифровой обработки сигнала. Между показаниями приборов существует прямая линейная связь, позволяющая при необходимости ввести пересчётный коэффициент. Таким образом, новый прибор превосходит эталонный по чувствительности на ранних стадиях твердения, сохраняя метрологическую преемственность с традиционными методами, что допускает его применение как для оперативного контроля, так и в автоматизированных системах управления печатью. Экспериментальные данные для каждого прибора были аппроксимированы линейными функциями (рисунок 3.21), что позволило получить следующие уравнения регрессии:

- для пластометра авторской конструкции:

$$P_{пл} = 0,035t - 0,080 \quad (3.5)$$

- для пенетрометра Georocket S068:

$$P_{пл} = 0,014t - 0,078 \quad (3.6)$$

Высокие значения коэффициентов достоверности аппроксимации ($R^2 > 0,94-0,95$) для обоих приборов свидетельствуют о том, что процесс набора пластической прочности смесью в исследуемом временном интервале (0-60 мин) с достаточной степенью точности описывается степенной моделью. Данное обстоятельство подтверждает адекватность применяемых методик измерений.

Сравнение угловых коэффициентов линейных трендов показало, что чувствительность разработанного пластометра к приращению пластической прочности во времени приблизительно в 2,4 раза выше, чем у традиционного измерительного устройства. Такое преимущество обусловлено двумя факторами: во-первых, применением более чувствительной регистрирующей аппаратуры; во-вторых, использованием конического индентора. В отличие от цилиндрического плунжера, создающего только одноосное сжатие, конический индентор инициирует в материале комбинированное напряжённое состояние (сжатие + сдвиг), которое значительно полнее отражает кинетику нарастания структурной прочности в условиях реального структурообразования.

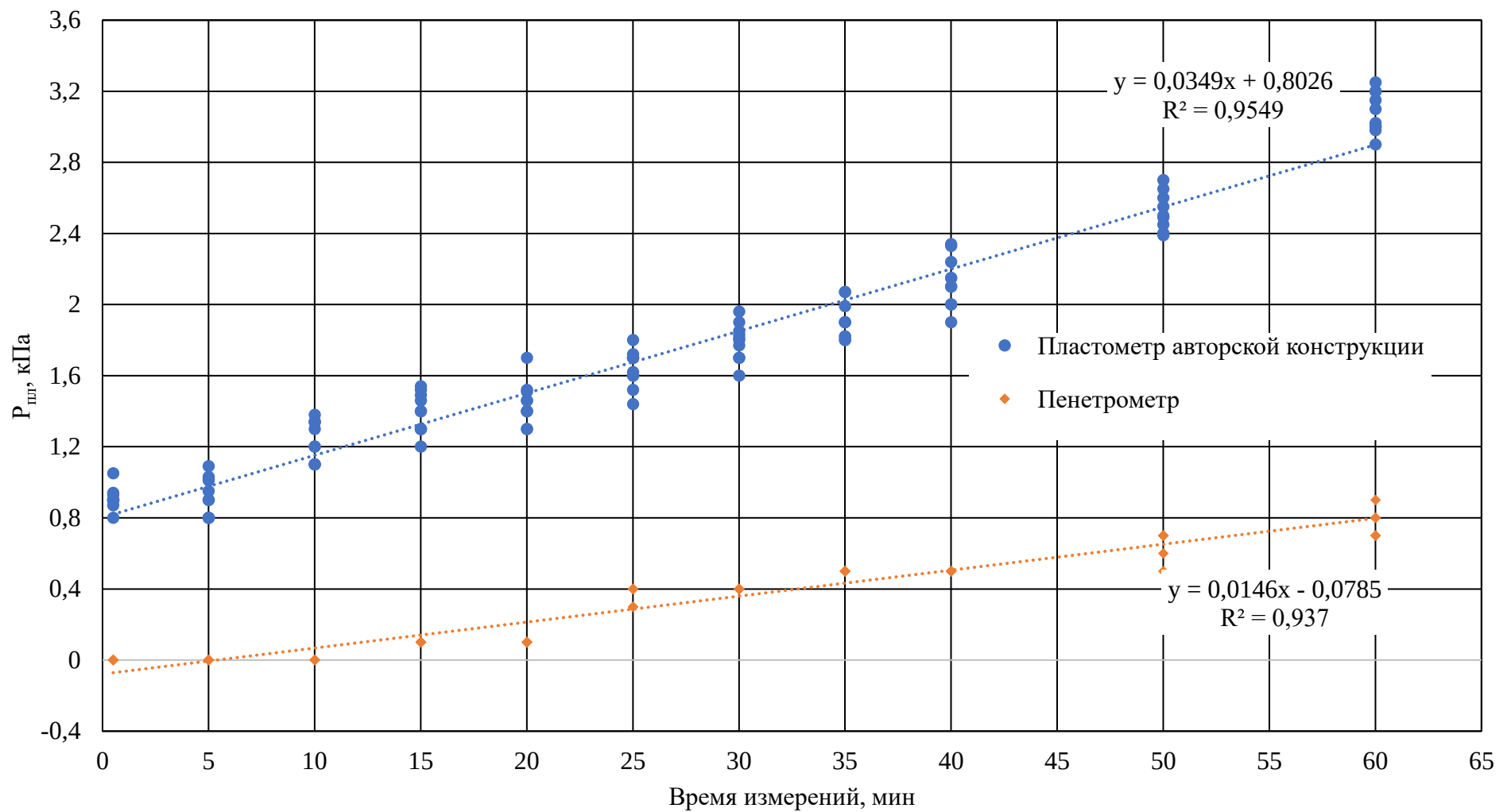


Рисунок 3.21 – Сравнение достоверности измерений на грунтовом пенетрометре и авторском пластометре

Установленная линейная корреляция между показаниями двух приборов подтверждает достоверность измерений, выполняемых разработанным устройством, и демонстрирует удовлетворительную сходимость результатов в рабочем диапазоне пластической прочности. При необходимости, для приведения данных, ранее полученных с использованием стандартного пенетрометра, к показаниям разработанного прибора (или наоборот), может быть введен эмпирический коэффициент пересчета, определяемый из соотношения угловых коэффициентов полученных регрессионных зависимостей. Наличие такой корреляции обеспечивает преемственность методик контроля и позволяет интегрировать новое устройство в существующие технологические регламенты без потери сопоставимости накопленных архивных данных.

Таким образом, проведенная верификация подтвердила, что разработанный прибор превосходит стандартный пенетрометр по чувствительности в области низких значений пластической прочности, обеспечивает более детальный мониторинг кинетики раннего структурообразования смеси и демонстрирует хорошее согласие с эталонным методом в рабочем диапазоне измерений. Указанные преимущества в сочетании с возможностью работы в широком интервале температур и пластической прочности делают прибор эффективным инструментом для оперативного контроля технологичности смесей как в лабораторных, так и в построечных условиях, а его электронная база создает предпосылки для интеграции в автоматизированные системы управления (АСУ ТП) процессом 3D-печати.

3.2.3 Обоснование требований к значениям пластической прочности смеси для 3D-печати

С целью установления количественных критериев технологичности смеси и определения граничных значений пластической прочности, обеспечивающих получение бездефектных печатных конструкций, была выполнена серия экспериментальной печати в процессе которой происходило послойное

формованию модельных вертикальных элементов (стен). В ходе экспериментов производилась регистрация значений пластической прочности свежеприготовленной смеси непосредственно перед началом печати, а также фиксировались геометрические параметры напечатанных конструкций (общая вертикальная деформация Δ , мм) и осуществлялась фотофиксация состояния слоев для последующей качественной оценки дефектности. Результаты контроля сведены в таблицу 3.6.

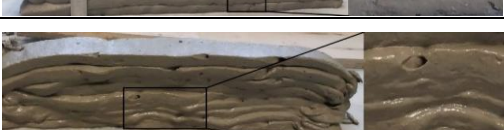
Анализ данных, представленных в таблице 3.5, в сопоставлении с визуальной оценкой дефектности слоев позволил выявить четкую взаимосвязь между величиной пластической прочности смеси и качеством формируемой печатной конструкции.

Экспериментально установлено, что при значениях пластической прочности $P_{пл} \geq 4,0$ кПа смесь характеризуется высокой структурной прочностью, что препятствует ее стабильному транспортированию от экструдера и выдавливанию через сопло печатающей головки. В результате процесс экструзии становится нестабильным либо полностью блокируется.

В диапазоне $P_{пл} = 2,8-4,0$ кПа смесь сохраняет способность к перекачиванию и экструдированию, однако наблюдается образование дефектов слоев в виде разрывов, недостаточной адгезии между смежными нитями, а также повышенных вертикальных деформаций ($\Delta = 4,1-4,6$). Слои при этом сохраняют формоустойчивость, не оплывают и выдерживают нагрузку от вышележащих слоев, но качество поверхности и сплошность структуры не соответствуют предъявляемым требованиям.

При снижении пластической прочности до значений $P_{пл} \leq 0,8$ кПа наблюдается прогрессирующая потеря формоустойчивости: свежеуложенные слои подвержены оплыванию, нижние слои не выдерживают веса вышележащих, что приводит к значительным вертикальным деформациям ($\Delta = 20,6-24,0$ мм) и увеличению коэффициента деформирования нижнего слоя ν до значений 1,38-1,93. Печать конструкций в данном диапазоне $P_{пл}$ не обеспечивает требуемой геометрической точности и несущей способности.

Таблица 3.5 – Результаты контроля качества модельных печатных элементов

Пластиче- ская проч- ность, $R_{пл}$	Общая вертикаль- ная деформация стены (Δ), мм	Коэффициент де- формирования нижнего слоя смеси, ν	Дефектность слоев (фотофиксация)
4,5	4,1	1,02	
2,64	4,6	1,13	
1,5	19,2	1,11	
1,2	21,8	1,28	
0,9	20,6	1,38	
0,4	24	1.93	

На основании проведенного анализа был определен оптимальный технологический диапазон пластической прочности $R_{пл} = 0,8-2,8$ кПа (рисунок 3.22), в пределах которого обеспечивается стабильное перекачивание смеси, равномерная экструзия, сохранение геометрии слоев после укладки и отсутствие критических дефектов. В указанном диапазоне значения общей вертикальной деформации не превышают 20 мм, коэффициент деформирования нижнего слоя сохраняется на уровне $\nu \approx 1,11-1,13$, а визуальная оценка подтверждает отсутствие оплывания и разрывов слоев.

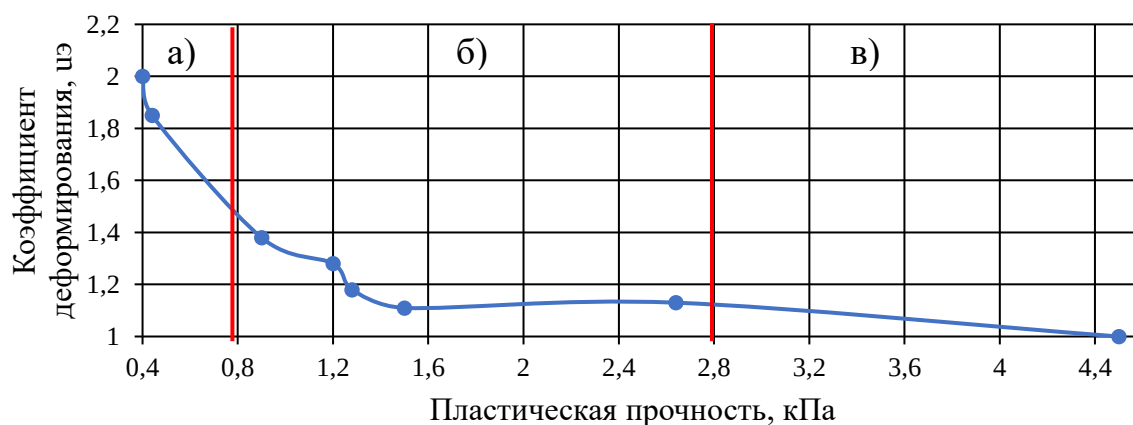


Рисунок 3.22 – Взаимосвязь между значениями показателя пластической прочности смеси и качеством модельных стеновых 3D-печатных элементов (а) зона неустойчивого состояния конструкций, (б) оптимальное качество конструкций, (в) зона появления дефектов слоев

Таким образом, диапазон $P_{пл} = 0,8-2,8$ кПа принят в качестве граничных критериев технологичности смеси для строительной 3D-печати. Последующие исследования влияния пластической прочности на физико-механические характеристики затвердевшего композита проводились при варьировании $P_{пл}$ именно в этом установленном диапазоне, что гарантирует получение репрезентативных данных для практического применения.

Уточнение технологического диапазона значений пластичности по характеристикам прочности 3D-печатных композитов. Экспериментальные исследования прочностных свойств затвердевшего композита проводились в пределах ранее установленного технологического диапазона пластической прочности свежеприготовленной смеси $P_{пл} = 0,8-2,8$ кПа, обеспечивающего стабильное формование слоёв без критических дефектов. Варьирование значений $P_{пл}$ в указанном интервале позволило оценить степень влияния исходного реологического состояния смеси на механические характеристики напечатанного материала при различных схемах нагружения. Результаты испытаний контрольных образцов представлены в таблицы 3.6.

Анализ полученных данных выявил нелинейный характер зависимости прочности сцепления слоёв (по показателю сопротивления сдвигу $R_{сдв}$) от пластической прочности смеси. При $P_{пл} \approx 1,0$ кПа зафиксировано максимальное

значение $R_{сдв} = 3,74$ МПа. При увеличении $P_{пл}$ до значений 2,6-2,7 кПа наблюдается снижение прочности сцепления до значений $R_{сдв} = 1,86$ -2,52 МПа (рисунок 3.23).

Таблица 3.6 – Результаты испытаний контрольных образцов на прочность

Пластическая прочность смеси, $P_{пл}$	Сжатие по оси Z (поперек слоя), $R_{сж}^Z$	Сжатие по оси X (вдоль слоя), $R_{сж}^X$	Изгиб по оси Z (поперек слоя), $R_{изг}^Z$	Изгиб по оси Y (с торца слоя), $R_{изг}^Y$
0,8	21,87	25,2	3,39	3,26
1,0	20,8	25,48	4,2	3,9
1,8	23,99	25,32	3,18	2,99
2,6	22,7	20,98	3,65	3,06
2,7	19,71	21,02	3,02	2,43

Показатели прочности при сжатии и изгибе снижаются по мере роста пластической прочности смеси. В исследованном диапазоне $P_{пл}$ прочность при сжатии вдоль направления укладки слоёв ($R_{сж}^X$) уменьшилась с 25,2 МПа до 21,0 МПа (снижение на 17,5%), прочность при сжатии поперёк слоёв ($R_{сж}^Z$) - с 22,0 МПа до 19,7 МПа (снижение на 17,9%). Ещё более выраженное падение прочности зафиксировано при изгибных нагружениях: прочность при изгибе поперёк слоёв ($R_{изг}^Z$) снизилась на 25,9% (с 4,2 МПа до 3,0 МПа), а при изгибе с торца слоя ($R_{изг}^Y$) - на 37,7% (с 3,9 МПа до 2,4 МПа).

Анализ взаимосвязи между показателем пластической прочности смеси и коэффициентом деформации слоёв позволил уточнить рациональный диапазон пластичности. При $P_{пл} \leq 0,8$ кПа наблюдается оплывание слоёв и потеря формоустойчивости. В интервале $P_{пл} = 0,8$ -1,8 кПа обеспечивается оптимальное качество печати: слои сохраняют геометрию, не оплывают и выдерживают нагрузку от вышележащих слоёв. При $P_{пл} \geq 1,8$ кПа фиксируется зона появления дефектов слоёв, связанных с недостаточной пластичностью смеси и ухудшением межслоевой адгезии.

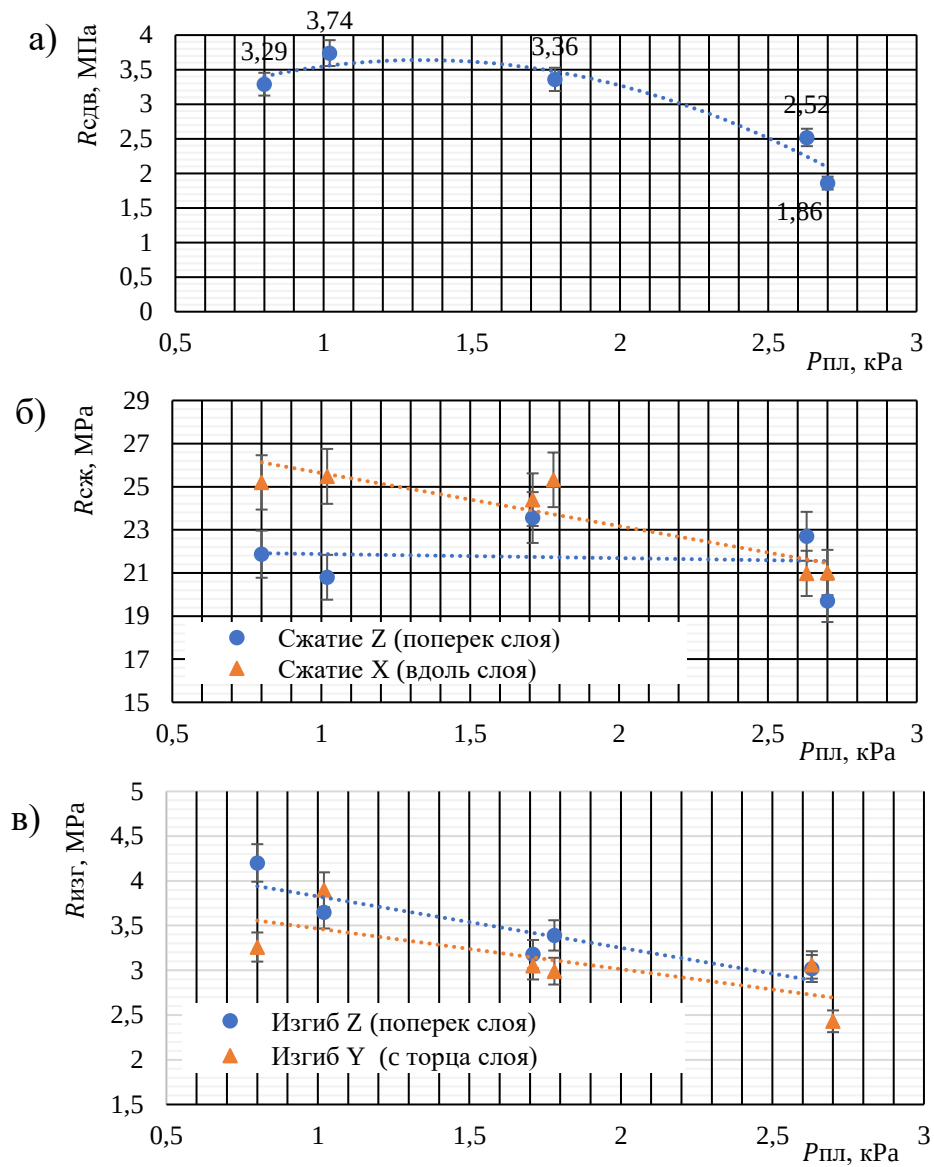


Рисунок 3.23 – Зависимость прочности 3D-печатного композита от пластической прочности смеси: (а) сдвиг слоев по оси X; (б) сжатие по осям Z и Y; (в) изгиб по осям Z и Y

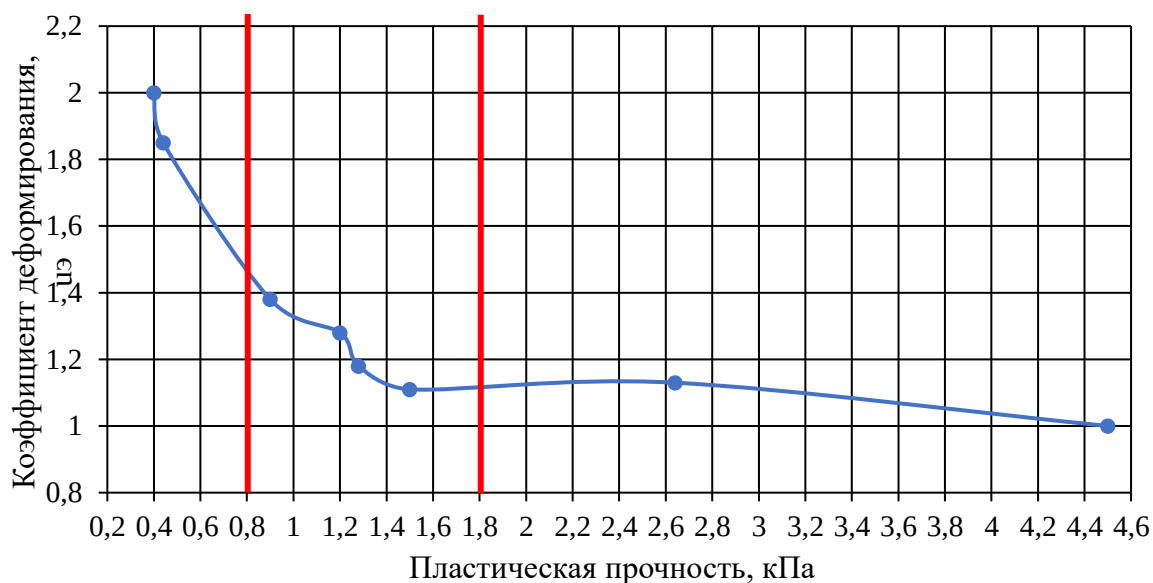


Рисунок 3.24 – Оптимальный диапазон пластической прочности для печати

Таким образом, значения $R_{пл}$ в интервале 0,8-1,8 кПа (рисунок 3.24) соответствуют максимальной прочности сцепления слоёв ($R_{сдв} = 3,3-3,7$ МПа), минимальному падению прочностных показателей при сжатии и изгибе, а также отсутствию дефектов печати, связанных с оплыванием или разрывами слоёв. Указанный диапазон рекомендуется в качестве технологического норматива при производстве работ методом строительной 3D-печати с использованием готовых к употреблению строительных смесей.

3.3 Определение требований к параметрам контроля и диапазону регулирования технологических режимов 3D-печати

3.3.1 Установление корреляционной взаимосвязи между значениями реологических и технологических параметров пластичности смесей

Оценка пластичности производилась методом сдавливающей реометрии с постоянной скоростью деформирования, поскольку этот режим нагружения наиболее адекватно воспроизводит поведение материала на этапе экструзии. Количественный критерий пластичности определяли по экспериментальным

зависимостям $F^* = f(h_i/R)$, которые отражают способность вязко-пластичной смеси к устойчивому течению без нарушения сплошности структуры под действием сжимающих напряжений (рисунок 3.25, 3.26).

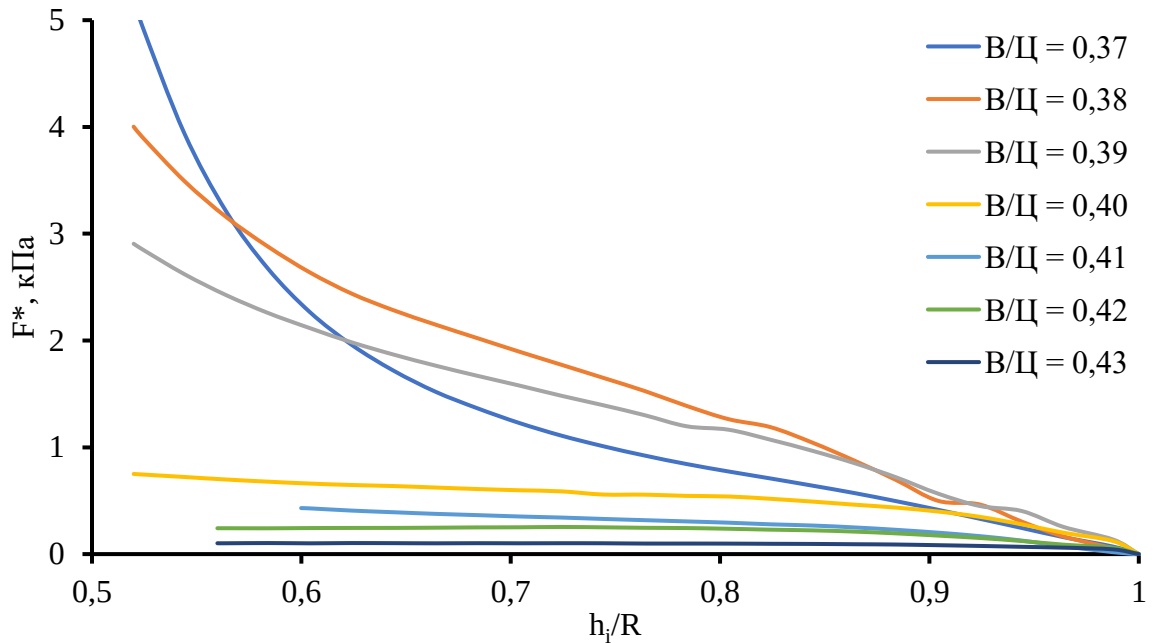


Рисунок 3.25 – Экспериментальные кривые $F^* = f(h_i/R)$ для микрозернистой системы (Ц-В-ИМ-СП)

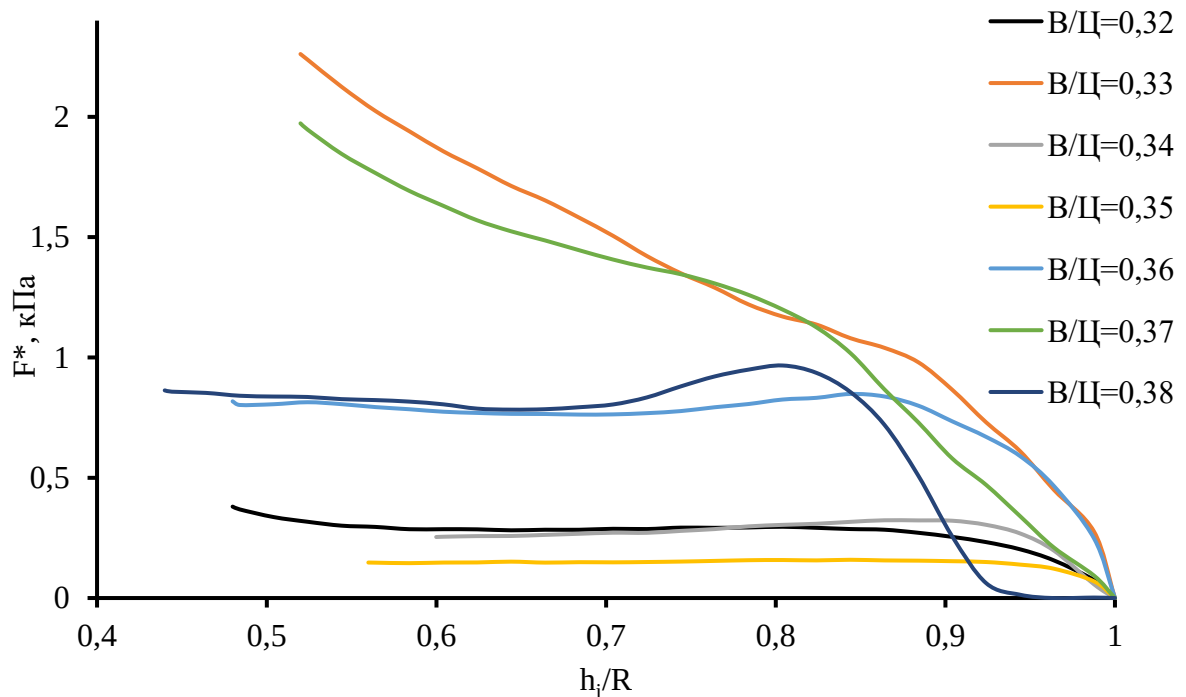


Рисунок 3.26 – Экспериментальные кривые $F^* = f(h_i/R)$ для мелкозернистой системы (Ц-В-П-СП-МКЛ)

Для получения статистически значимой выборки в пределах установленного ранее технологического диапазона пластической прочности (до 2,8 кПа) проведены испытания мелкозернистой и микрозернистой смесей с варьированием водоцементного отношения. Это позволило изменять значения предела пластичности $K_i(I)$ в интервале от 0,15 до 1,45 кПа и соответствующие им показания авторского пластометра $P_{пл}$ от 0,45 до 2,0 кПа. Полученный массив парных данных ($K_i(I)$, $P_{пл}$) для двух типов смесей сформировал основу для следующего корреляционного анализа.

Для исследованных смесей установлены два типа реологического поведения. Кривые первого типа отличаются наличием ярко выраженного горизонтального участка пластического деформирования, заключённого между двумя характерными точками перегиба. Первый перегиб фиксирует переход материала в состояние пластического течения при сохранении сплошности структуры; соответствующий этому моменту критерий пластичности $K_i(I)$ служит непосредственной характеристикой способности смеси к экструдированию. Второй перегиб указывает на начало структурного разрушения. В этой точке происходит нарушение сплошности структуры и запускается необратимая деградация материала. Отсюда следует, что технологический диапазон внешних нагрузок при экструзии таких смесей необходимо ограничивать областью между первым и вторым перегибами: только в этих пределах обеспечивается бездефектная укладка слоя в процессе 3D-печати.

На основе средних значений предела пластичности $K_i(I)$ и соответствующих технологических показателей экструдированности $P_{пл}$, полученных для исследованных систем по результатам сдавливающих тестов, выполнен корреляционный анализ. Полученная корреляционная зависимость между пределом пластичности $P_{пл}$ (определяемым разработанным пластометром) и реологическим параметром экструдированности $K_i(I)$ представлена на рисунке 3.27.

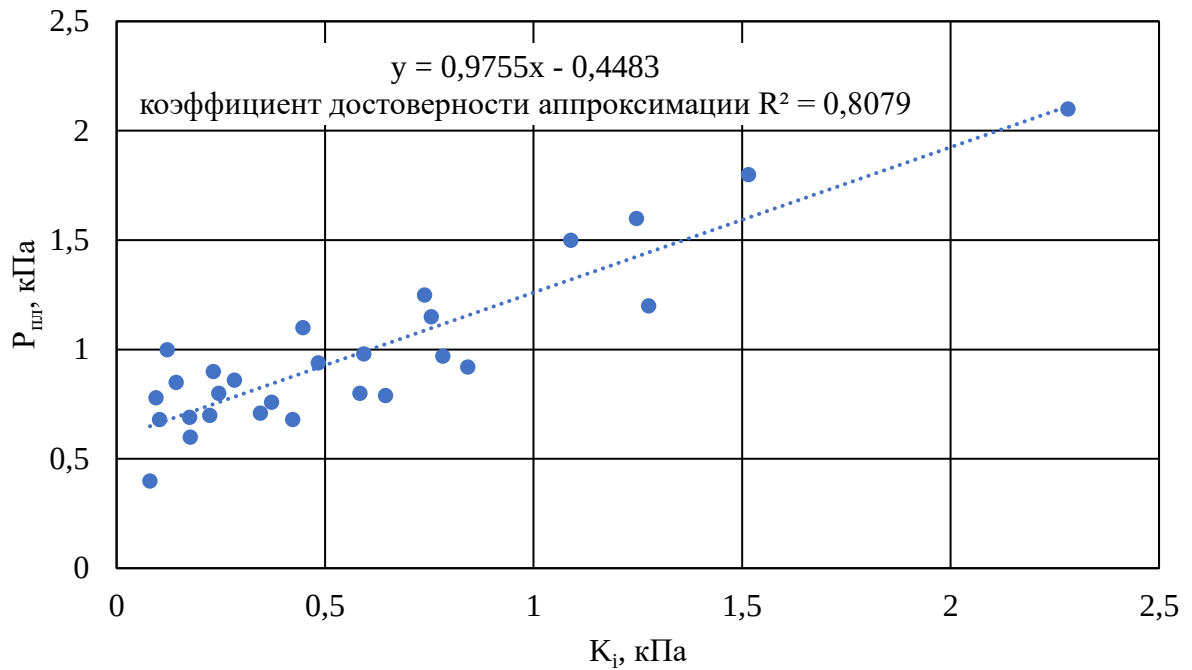


Рисунок 3.27 – Зависимость между пределом пластичности $K_i(I)$ и технологическим показателем экструдруемости $P_{\text{пл}}$

Получено уравнение линейной регрессии:

$$P_{\text{пл}} = 0,97 \cdot K_i(I) - 0,45 \quad (3.7)$$

Установленная зависимость позволяет с достаточной для практики точностью (коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,81$) прогнозировать технологичность смеси на основе экспресс-измерений пластической прочности $P_{\text{пл}}$, выполняемых разработанным прибором. Полученные корреляционные соотношения могут быть использованы для включения результатов реологического моделирования и данных оперативного контроля в систему управления технологическим процессом строительной 3D-печати.

3.3.2 Определение точки оперативного контроля показателя технологичности смеси для 3D-печати

В рамках отработки методики оперативного контроля технологических свойств смеси непосредственно в процессе строительной 3D-печати был проведён сравнительный анализ значений пластической прочности, измеренных на входе в экструдер и на выходе из него. Целью анализа являлось определение допустимости выполнения замеров в различных точках технологической линии без внесения систематической погрешности в оценку состояния смеси.

Экспериментальные измерения выполнялись с использованием разработанного прибора на образцах смеси, отбираемых из загрузочного бункера (вход в экструдер) и непосредственно из сопла печатающей головки (выход из экструдера). Результаты параллельных определений пластической прочности $R_{пл}$ для восьми опытов с варьированием начальной пластичности смеси приведены на рисунке 3.28.

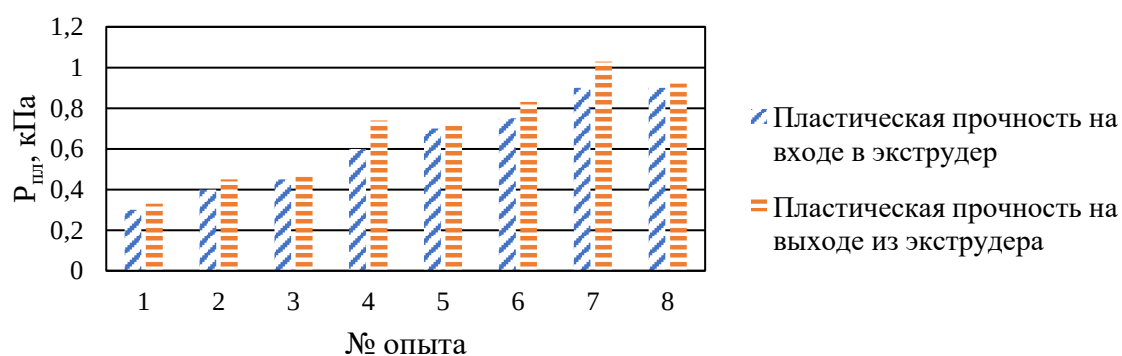


Рисунок 3.28 – Значения пластической прочности цементной смеси в зависимости от точки контроля

Анализ полученных данных показывает, что для большинства опытов значения пластической прочности, зарегистрированные на выходе из экструдера, незначительно превышают показатели на входе. Наблюдаемое увеличение $R_{пл}$ составляет в среднем 0,02-0,12 кПа и может быть объяснено эффектом

механического уплотнения при прохождении смеси через шнековый экструдер и формующее сопло или погрешностью измерений.

Статистическая обработка результатов парных измерений свидетельствует о том, что расхождения между входными и выходными значениями находятся в пределах допустимой погрешности эксперимента и не носят систематического характера. Коэффициент корреляции между двумя рядами данных превышает 0,95, что указывает на наличие устойчивой линейной взаимосвязи. Таким образом, $R_{пл}$ выступает в роли комплексного показателя технологичности смеси, достаточного для оперативного определения её состояния.

На основании выполненного анализа установлено, что измерение пластической прочности смеси может производиться как на входе в экструдер, так и на выходе из него в зависимости от конструктивных особенностей печатного оборудования и удобства размещения измерительного узла. Выбор точки контроля не оказывает существенного влияния на достоверность оценки технологического состояния смеси и может определяться условиями конкретного производства.

3.3.3 Определение требований к параметрам контроля и диапазону регулирования технологических режимов 3D-печати

На основе выполненного численного моделирования и экспериментальных данных установлены сочетания технологических и реологических параметров, обеспечивающих бездефектность экструзионных слоев и устойчивость 3D-печатных объектов (таблица 3.7). Ранее определённый оптимальный диапазон пластической прочности $R_{пл} = 0,8-2,0$ кПа был разделён на три характерных поддиапазона, для каждого из которых определены рекомендуемые параметры процесса печати и соответствующие им реологические характеристики смеси (экспериментальные и используемые в качестве входных данных для моделирования).

Совокупный анализ полученных ранее результатов позволяет выделить ключевой массив данных для прогнозирования и построения алгоритма

управления процессом 3D-печати. Численное моделирование течения смеси по модели Хершеля-Балкли и верификация на лабораторном принтере дали чёткую сетку соответствия: каждому из трёх поддиапазонов $P_{пл}$ поставлены в соответствие оптимальные значения частоты вращения шнека, скорости движения сопла, высоты слоя и диаметра сопла, гарантирующие стабильную геометрию слоя и межслоевую адгезию.

Таблица 3.7 – Диапазон характеристик смеси и параметров процесса, обеспечивающих устойчивость 3D-печатных структур

Наименование параметров		Диапазоны регулирования и управления		
Пластичность смеси $P_{пл}$, кПа		0,8-1,2	1,2-1,6	1,6-2,0
Реологические характеристики смеси				
Статическая вязкость η_0 , Па·с		350-360	360-370	370-380
Динамическая вязкость η , кПа·с		10-15	15-20	20-25
Предел текучести $\tau_{кл}$, Па		25-45	45-65	65-85
Оценка предела пластичности. (при сдавливании) $K_i(I)$, кПа		0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-1,1
Входные параметры для моделирования				
Предел текучести τ_0 , Па		200-350	350-450	450-600
Индекс степенного закона n		0,30-0,45	0,45-0,60	0,60-0,75
Критическая скорость деформации		0,0010-0,0025	0,0025-0,0035	0,0035-0,0050
Коэффициент вязкости K , Па·с ⁿ		25-100	100-150	150-250
Параметры процесса				
Диаметр сопла $D_{сопла}$, мм		20-25	25-30	30-35
Скорость движения сопла V , мм/с		33-50	50-67	67-83
Высота печатного слоя, мм		10-15	15-20	20-25
Скорость подачи материала U	см ³ /с	10-15	15-20	20-25
	г/с	20-30	30-40	40-50
Параметр относительной скорости перемещения сопла V/U		1,0-1,2	1,2-1,4	1,4-1,5
Скорость вращения шнека, об/мин	Задаваемая в программе	200-300	300-400	400-500
	Фактическая	20-30	30-40	40-50

Данные зависимости заложены в основу предлагаемой системы контроля и управления процессом 3D-печати, которая позволяет реализовать управление процессом по фактическому реологическому состоянию смеси в реальном времени, компенсируя вариативность её свойств и обеспечивая стабильное качество возводимых конструкций без вмешательства оператора.

Управление процессом включает следующую систему шагов.

1. На начальном этапе специалист по 3D-моделированию создаёт CAD-модель изделия на основании технического задания и архитектурного эскиза. Генерируется управляющий код (G-код), задаются начальные параметры процесса: скорость перемещения сопла, высота печатаемого слоя, частота вращения шнека и диаметр сопла. Сформированный G-код проходит верификацию на принципиальную возможность печати данной CAD-модели; при выявлении геометрических или технологических ограничений модель возвращается на доработку.

2. Поступившая партия сухой смеси подвергается входному контролю с участием инженера-технолога. Определяется диапазон значений пластической прочности $P_{пл}$, который сопоставляется с расчётными диапазонами.

3. Результаты контроля передаются инженеру -программисту, который выполняет численное моделирование процесса 3D-печати с использованием CFD-пакета ANSYS Fluent и модели Хершеля-Балкли. Целью моделирования является установление оптимальных технологических параметров печати изделия заданной геометрии при использовании смеси с определенным на этапе входного контроля диапазоном значений пластической прочности $P_{пл}$. В результате моделирования весь диапазон значений $P_{пл}$ разбивается на интервалы, для каждого интервала определяются параметры печати (скорость перемещения сопла V , высота слоя h , частота вращения шнека $V_{ш}$, максимальная высота печати без перерывов H), обеспечивающие геометрическую точность и устойчивость задаваемой модели изделия.

4. После моделирования осуществляется передача файлов с режимами печати на 3D-принтер. Процесс начинается с приготовления смеси, после завершения которого контролируется показатель пластичности $P_{пл}$. В соответствии с установленным значением выбирается режим печати из полученного по результатам моделирования набора режимов для заданного изделия.

5. При выходе показателя пластичности за пределы допустимого интервала ($P_{пл} = 0,8-2,8$ кПа) производится оперативная корректировка состава смеси для возврата в рабочий диапазон.

6. В процессе печати осуществляется непрерывный мониторинг состояния смеси, а на завершающей стадии производится оценка качества полученного изделия. Все параметры процесса и результаты контроля регистрируются в журнале производства работ.

3.4 Выводы по главе 3

1. Экспериментально определены требования к значениям реологических характеристик смесей, обеспечивающих бездефектность экструзионного слоя и устойчивость модельных 3D-печатных объектов. Установлено, что граничными значениями реологических характеристик являются:

- при сдвиге - статическая вязкость 300-350 Па·с; динамическая вязкость 20-80 Па·с, статический предел текучести 240-260 Па; предел текучести (по Бингаму) 30-90 Па;

- в условиях действия нормальных напряжений (при сдавливании) оценка предела пластичности 1,5-2,2 кПа.

2. На основании результатов численного моделирования и их экспериментальной верификации установлено, что реологическая модель Хершеля-Балкли адекватно аппроксимирует экспериментальные зависимости вязкости пластичной системы от скорости деформации и обеспечивает достоверное прогнозирование геометрии печатных слоёв и устойчивости модельных 3D-печатных объектов. Полученное расхождение по толщине слоя в пределах 3-9% позволяет рекомендовать данную модель для практических инженерных расчётов технологических режимов, а также для использования при обосновании режимов печати 3D-печати с учетом фактического реологического поведения смесей, готовых к употреблению.

3. По результатам численного моделирования установлены обобщённые критерии устойчивости 3D-печатных структур, включающие:

- 1) граничные значения входных реологических параметров смеси для численного моделирования: предел текучести $\tau_0 = 200-600$ Па; индекс

степенного закона модели Хершеля-Балкли $n = 0,3-0,75$; коэффициент вязкости $K = 25-250 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$;

2) диапазон регулирования параметров процесса 3D-печати: диаметр сопла 10-25 мм; скорость подачи материала $U = 10-25 \text{ см}^3/\text{с}$; скорость движения сопла $V = 10-30 \text{ мм/с}$; параметр относительной скорости перемещения сопла $V/U = 1,0-1,5$.

4. Для решения задач производственного контроля разработан прибор для измерения технологических свойств неорганических строительных смесей для строительной 3D-печати. В основу положен принцип действия грунтового пенетromетра, реализующего метод оценки пластичности через сопротивление внедрению индентора. В отличие от стандартных приборов, оснащенных цилиндрическим плунжером, разрабатываемое устройство наследует кинематическую схему и физическую модель конического пластометра конструкции МГУ (метод П.А. Ребиндера). Апробация прибора показала, что он превосходит стандартный грунтовой пенетromетр по чувствительности. Диапазон измерений пластической прочности составляет $P_{пл} = 0,4-4,0 \text{ кПа}$, что полностью перекрывает область технологически значимых состояний смеси для строительной 3D-печати.

5. Определены требования к параметрам контроля и диапазону регулирования технологических характеристик смесей для 3D-печати. Технологический диапазон значений пластической прочности свежеприготовленной смеси составляет $P_{пл} = 0,8-2,8 \text{ кПа}$, при этом обеспечивается отсутствие оплывания или разрыва слоёв, устойчивость печатных объектов. Одновременно в диапазоне $P_{пл} = 0,8-2,0 \text{ кПа}$ гарантировано минимальное изменение прочностных показателей при сжатии и изгибе по отношению к монолитным образцам.

6. На основании выполненной верификации разработанного прибора и метода оценки технологических характеристик смесей методом сдавливающей реометрии, их следует признать достоверными и адекватными в соответствии с требованиями технологии 3D-печати. Получено уравнение линейной регрессии между технологическим показателем пластичности $P_{пл}$ и оценкой

предела пластичности при сдавливании $K_i(I)$, которое может быть использовано для включения результатов реологического моделирования и данных оперативного контроля в систему управления технологическим процессом строительной 3D-печати.

7. Разработан и изготовлен лабораторный прототип строительного 3D-принтера, обеспечивающий возможность работы с высоковязкими, низко-текучими смесями. По результатам опытной печати на данном принтере и сопоставления экспериментальных данных с результатами численного моделирования установлены количественные требования к диапазону регулирования технологических режимов: весь рабочий интервал $P_{пл}$ разбит на три поддиапазона (0,8-1,2, 1,2-1,6, 1,6-2,0 кПа), каждому из которых поставлены в соответствие рекомендуемые параметры режимов печати, а также входные данные для численного моделирования. На основании этого предложена система контроля и управления процессом 3D-печати по фактическим реологическим и технологическим характеристикам смесей, компенсируя вариативность их свойств и обеспечивая стабильное качество возводимых конструкций.

4 ПРИКЛАДНЫЕ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЕ

В данной главе изложены результаты апробации разработанных методов контроля и управления производственным циклом строительной 3D-печати на опытно-промышленной производственной площадке ВГТУ. Сформулированы требования к методу оперативного контроля технологических свойств смесей, представлены положения по методике и алгоритму управления производственным циклом строительной 3D-печати. Разработаны и внедрены:

- инструкция подготовки CAD-моделей строительных изделий для 3D-печати;

- технологическая инструкция по контролю качества смесей для 3D-печати, готовых к употреблению, включающая методику оперативного измерения пластической прочности $R_{пл}$;

- технологическая инструкция управления печатью на строительном 3D-принтере.

На методику и устройства контроля качества цементных смесей получены Свидетельства на секрет производства (ноу-хау) №2023004 [127] (Приложение Г), №2023006 [128] (Приложение Д). На программное обеспечение разработанных средств контроля пластичности смеси (пластометры для оперативного и лабораторного контроля) получены Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026661582 ([129], Приложение Е), № 2026610930 ([130], Приложение Ж), патент на полезную модель №244065 ([131], Приложение З), патент на полезную модель №244271 ([132], Приложение И). На технологический комплекс для строительной 3D-печати получено Свидетельство на секрет производства (ноу-хау) №2022001 (см. Прил. Б).

Методы контроля строительной смеси для 3D-печати апробированы и внедрены в процесс производственного контроля ООО «БетоникАРТ» (Приложение К). Методика цифрового моделирования процесса 3D-печати

апробирована компанией ООО «КЕЙКОД» при изготовлении строительных 3D-принтеров (Приложение Л).

Разработанные CAD-модели малых архитектурных форм прошли независимую экспертизу соответствия параметрам печати на строительном 3D-принтере (Приложение М).

4.1 Результаты опытно-промышленной апробации

В ходе апробации на 3D-принтере «KEYCODE» на опытно-промышленной производственной площадке ВГТУ была выполнена 3D-печать серий образцов базовых геометрических форм (прямоугольная призма со скруглением, куб, цилиндр). Печать конструкций производилась с применением мелкозернистой смеси на кварцевом песке (патент RU 2729085 [80]).

Варьируемыми факторами служили:

- показатель пластичности смеси $P_{пл}$;
- параметры процесса - скорость линейного перемещения, скорость вращения шнека экструдера, диаметр сопла, высота печатаемого слоя.

В процессе испытаний для каждого образца регистрировались следующие показатели: диапазон пластичности (пластическая прочность смеси после приготовления и по окончании печати), устойчивость объекта (визуально, по отсутствию оплывания и деформаций нижних слоёв), геометрические параметры единичного слоя (высота, ширина) и максимальная достигнутая высота до потери формоустойчивости. Условия отдельных опытов и соответствующие им выходные характеристики систематизированы в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты промышленной печати элементов

Объект исследования	Режимы печати				Диапазон пластичности, кПа	Контролируемые параметры			
	Скорость печати, мм/с	Обороты шнека при печати, об/мин	Диаметр сопла, мм	Высота печатаемого слоя, мм		Количество слоев	Высота печатного объекта, мм	Ширина слоя, мм	Фото
Прямоугольник со скруглением	84	160	27	20	1,1-1,3	22	220	38	
	84	160	27	20	1,5-1,6	20	200	37	
	84	162	27	20	1,5-1,6	24	240	40	

Продолжение таблицы 4.1

Объект исследования	Режимы печати				Диапазон пластичности, кПа	Контролируемые параметры			
	Скорость печати, мм/с	Обороты шнека при печати, об/мин	Диаметр сопла, мм	Высота печатаемого слоя, мм		Количество слоев	Высота печатного объекта, мм	Ширина слоя, мм	Фото
Прямоугольник со скруглением	84	160	30	20	1,5-1,6	22	220	45	
	84	162	30	10	1,8-2,0	27	270	44	

Продолжение таблицы 4.1

Объект исследования	Режимы печати				Диапазон пластичности, кПа	Контролируемые параметры			
	Скорость печати, мм/с	Обороты шнека при печати, об/мин	Диаметр сопла, мм	Высота печатаемого слоя, мм		Количество слоев	Высота печатного объекта, мм	Ширина слоя, мм	Фото
Прямоугольник со скруглением	84	162	27	10	2,0-2,2	29	290	36	
	84	161	27	14	1,9-2,1	24	330	37	

Продолжение таблицы 4.1

Объект исследования	Режимы печати				Диапазон пластичности, кПа	Контролируемые параметры			
	Скорость печати, мм/с	Обороты шнека при печати, об/мин	Диаметр сопла, мм	Высота печатаемого слоя, мм		Количество слоев	Высота печатного объекта, мм	Ширина слоя, мм	Фото
Прямоугольник со скруглением	84	175	27	10	1,9-2,1	30	300	35	
	84	284	27	20	2,3	24	280	38	

Продолжение таблицы 4.1

Объект исследования	Режимы печати				Диапазон пластичности, кПа	Контролируемые параметры			
	Скорость печати, мм/с	Обороты шнека при печати, об/мин	Диаметр сопла, мм	Высота печатаемого слоя, мм		Количество слоев	Высота печатного объекта, мм	Ширина слоя, мм	Фото
Цилиндр	84	162	30	20	2,4	9	180	40	
Куб	84	132	20	10	1,7	10	100	25	

Продолжение таблицы 4.1

Объект исследования	Режимы печати				Диапазон пластичности, кПа	Контролируемые параметры			
	Скорость печати, мм/с	Обороты шнека при печати, об/мин	Диаметр сопла, мм	Высота печатаемого слоя, мм		Количество слоев	Высота печатного объекта, мм	Ширина слоя, мм	Фото
Куб	50	166	27	20	1,7	20	400	35	
	50	166	27	20	1,1		180	33	

Анализ данных таблицы 4.1 показывает, что устойчивость конструкции определяется совокупным влиянием нескольких факторов. С ростом пластической прочности смеси, как правило, увеличивается максимальная высота объекта, набираемая без деформаций. Для большинства рассмотренных геометрических форм оптимальным оказался диаметр сопла 27 мм при линейной скорости 84 мм/с; диапазон оборотов шнека 160-170 об/мин обеспечивает массовый расход, достаточный для формирования слоя шириной около 27 мм без переуплотнения нижних слоёв. При повышенных значениях пластической прочности смеси (2,0-2,4 кПа) допустимо увеличить обороты шнека до 280-290 об/мин, что позволяет сохранять темп печати при увеличенной высоте слоя. Использование сопла меньшего диаметра (20 мм) требует пропорционального снижения оборотов и, как правило, меньшей высоты слоя, что целесообразно для элементов сложной геометрии.

Для уточнения параметров численного моделирования проведены стендовые испытания экструдера промышленного принтера «KEYCODE». В процессе испытаний устанавливались количественные зависимости между скоростью вращения шнека и массовым расходом смеси. Экструдер последовательно оснащался сменными соплами диаметрами 20, 27 и 30 мм. Вращение шнека осуществляется серводвигателем через понижающий редуктор с передаточным отношением 1:15, поэтому действительная частота вращения шнека в 15 раз ниже значения, задаваемого в управляющей программе и отображаемого на интерфейсе «PUMOTIX».

Результаты измерений представлены на рисунке 4.1. На рисунке 4.1 а показана зависимость массового расхода от скорости вращения шнека, вводимой в программу (об/мин на валу двигателя до редуктора). На рисунке 4.1 б та же зависимость перестроена относительно фактической скорости шнека после редуктора.

Для всех трёх типоразмеров сопла в исследованном интервале скоростей наблюдается монотонный, близкий к линейному рост массового расхода с увеличением частоты вращения шнека. Количественно расход возрастает с ростом

диаметра сопла при фиксированной скорости, что объясняется снижением гидравлического сопротивления на выходе.

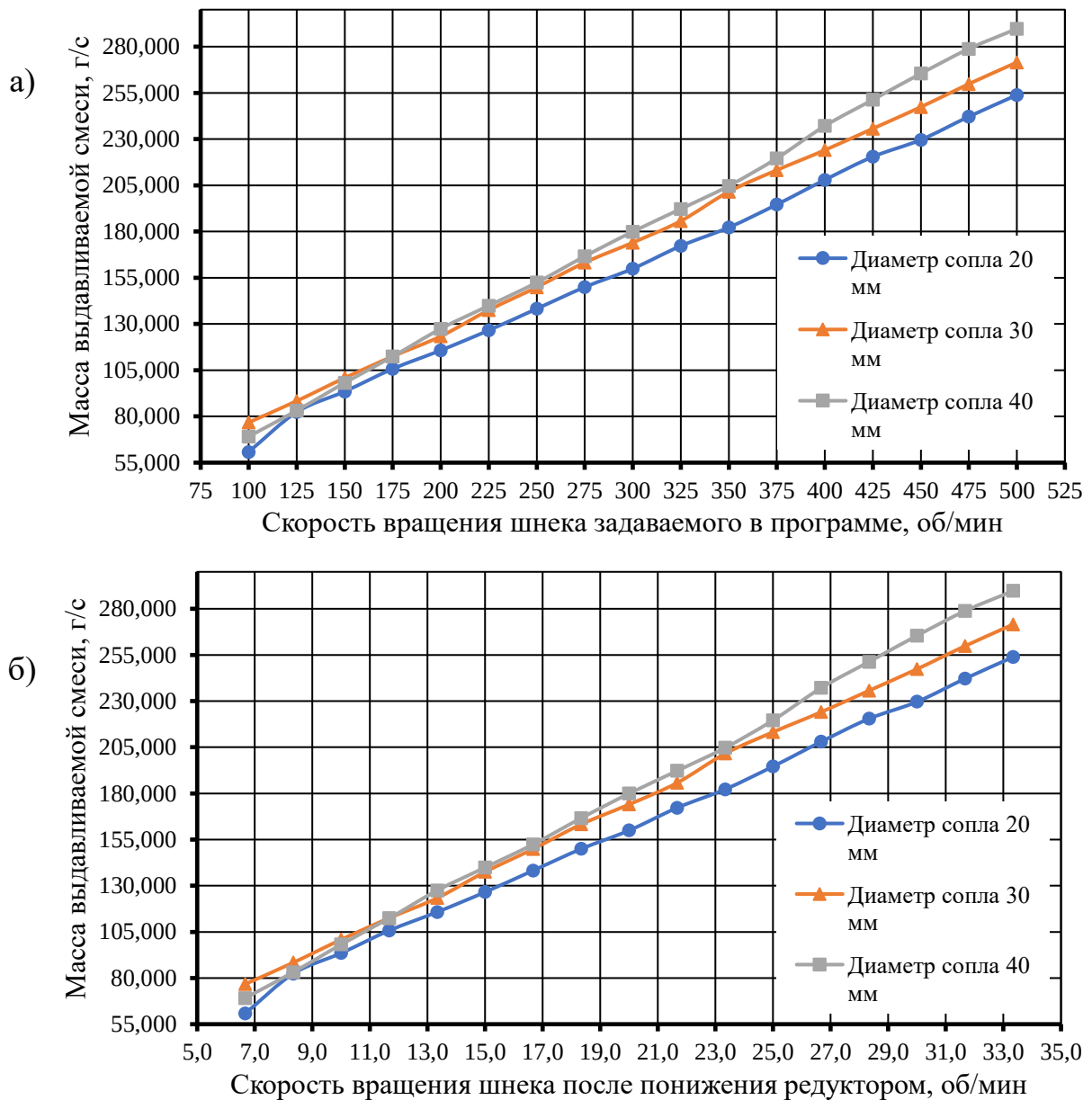


Рисунок 4.1 – Зависимость массы выдавливаемой смеси от скорости вращения шнека, задаваемой в программе: а) зависимость массового расхода от скорости вращения шнека, б) зависимость массового расхода относительно фактической скорости шнека после понижения редуктором (1 : 15)

Прикладное значение полученных градуировок состоит в возможности оперативного расчёта расхода смеси непосредственно во время печати. Зная текущее значение скорости шнека, выводимое на экран системы управления, по

соответствующей кривой (с учётом установленного диаметра сопла) определяется массовый расход, а после деления на плотность смеси - объёмный.

Это позволяет:

- прогнозировать скорость укладки материала и общую продолжительность печати изделия;
- подбирать начальные значения расхода материала при планировании траектории в слайсере;
- использовать расход материала как граничное условие в численных моделях экструзии и расчёте формоустойчивости свежеложенного слоя.

На основании полученных данных уточнены полученные в ходе экспериментальных исследований (см. табл. 3.8) диапазоны характеристик смеси и параметров процесса, обеспечивающих устойчивость 3D-печатных структур (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Диапазон характеристик смеси и параметров процесса, обеспечивающих устойчивость 3D-печатных структур

Наименование параметров		Диапазоны регулирования и управления		
Пластичность смеси $P_{пл}$, кПа		1,1-1,6	1,6-2,0	2,0-2,4
Реологические характеристики смеси				
Статическая вязкость η_0 , Па·с		360-370	370-380	380-390
Динамическая вязкость η , кПа·с		15-20	20-24	24-28
Предел текучести $\tau_{кл}$, Па		40-65	65-85	85-105
Оценка предела пластичности (при сдавливании) $K_i(I)$, кПа		0,8-0,9	0,9-1,1	1,1-1,2
Входные параметры для моделирования				
Предел текучести τ_0 , Па		250-450	450-600	550-750
Индекс степенного закона n		0,40-0,60	0,60-0,75	0,70-0,85
Критическая скорость деформации		0,0020-0,0035	0,0035-0,0050	0,0045-0,0060
Коэффициент вязкости K , Па·с ⁿ		80-150	150-250	230-350
Параметры процесса				
Диаметр сопла $D_{сопла}$, мм		20-25	25-27	27-30
Скорость движения сопла V , мм/с		50-83	83	83
Высота печатного слоя, мм		10-15	20	20
Скорость подачи материала U	см ³ /с	40-55	55-65	65-80
	г/с	80-110	110-130	130-160
Параметр относительной скорости перемещения сопла V/U		1,57-3,46	2,13-2,61	1,73-2,13
Скорость вращения шнека, об/мин	Задаваемая в программе	120-170	120-160	280-290
	Фактическая	8-11	8-11	18-19

4.2 Практические рекомендации по контролю и управлению производственным циклом строительной 3D-печати

На основе обобщения результатов, представленных в таблицах 4.1, 4.2, разработаны рекомендации по выбору технологических режимов в зависимости от пластичности смеси и типа геометрии возводимого объекта (таблица 4.3). Рекомендации задают начальные значения управляющих параметров, гарантирующие устойчивое послойное возведение конструкций из цементной смеси с известным показателем $R_{пл}$.

Таблица 4.3 – Рекомендуемые технологические режимы 3D-печати

Тип фигуры	Показатель пластичности, кПа	Скорость печати, мм/с	Диаметр сопла, мм	Высота слоя, мм	Частота вращения шнека, об/мин	Ожидаемая высота (не менее), мм
Прямоугольник со скруглением 400 × 150 × 200	1,1-2,0	84	27	10-20	160-170	300
	2,0-2,4			20	280-290	280
Куб 300 × 300 × 300	1,1-1,7	50	27	20	160-170	400
	1,6-1,9	84	20	10	120-135	180
Цилиндр 300 × 300 × 300	2,3-2,4	84	30	20	160-170	180

Для автоматизации выбора рациональных режимов и предотвращения потери устойчивости в процессе печати разработан алгоритм, объединяющий этапы входного контроля, проектную и технологическую стадии производственного цикла 3D-печати (рисунок 4.2).

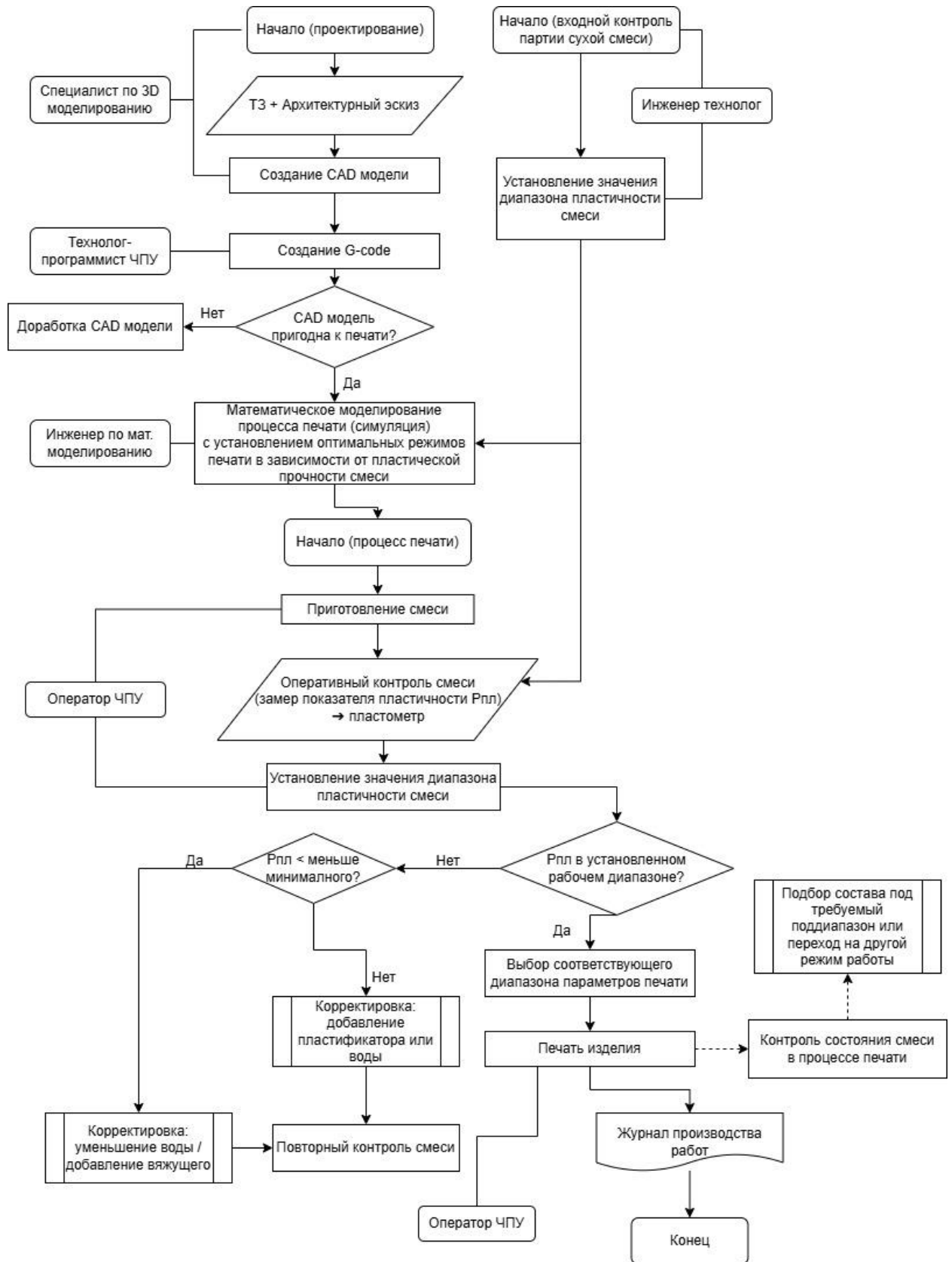


Рисунок 4.2 – Блок схема управления производственным циклом 3D-печати

Алгоритм управления производственным циклом строительной 3D-печати. Предложенная система управления реализует замкнутый адаптивный цикл, компенсирующий вариативность свойств смеси и обеспечивающий стабильное качество конструкций без вмешательства оператора. Управление включает следующие шаги.

1. Проектирование CAD-модели и подготовка G-кода производится на основании технического задания и архитектурного эскиза. Оператор создаёт цифровую модель изделия с учётом технологических ограничений строительной 3D-печати. Выполняется слайсинг, генерируется управляющий код (G-код) и проверяется на принципиальную возможность печати. При выявлении ограничений модель возвращается на доработку. Параллельно с этим выполняется входной контроль смеси.

2. Входной контроль смеси осуществляется с помощью разработанного пластометра. При этом определяется показатель пластической прочности $R_{пл}$ партии сухой смеси. Варьированием водоцементного (водотвёрдого) соотношения смесь доводится до состояния, обеспечивающего формоустойчивость и экструдированность, затем фиксируется диапазон пластичности, в котором данная партия сохраняет технологические свойства. Этот диапазон передаётся на этап математического моделирования.

3. Математическое моделирование. Используется CFD-пакет ANSYS Fluent и реологическая модель Хершеля-Балкли, для выполнения численной симуляции процесса печати. На вход подаются траектория печати (G-код) и экспериментально установленный диапазон пластичности смеси. В результате моделирования для каждого значения $R_{пл}$ внутри диапазона определяются оптимальные технологические параметры: скорость перемещения сопла, высота слоя, частота вращения шнека и максимально допустимая высота печати без перерывов. Весь диапазон разбивается на ряд характерных поддиапазонов, для каждого из которых формируется свой набор уставок. Результаты моделирования оформляются в виде «Карты» технологических параметров печати.

4. Предпечатный контроль и запуск. На производство передается управляющая программа (G-код) и «Карта» параметров. Непосредственно перед началом работы приготавливается смесь по рецептуре и выполняется измерение её фактической пластической прочности $P_{пл}$. Если значение выходит за границы допустимого рабочего диапазона (0,8-2,8 кПа), производится оперативная корректировка состава (добавление воды или пластификатора) и повторный контроль до попадания в требуемый интервал. Как только смесь попадает в допустимый диапазон, оператор по «Карте» параметров выбирает соответствующий поддиапазон и назначает уставки скорости перемещения сопла, высоты слоя и частоты вращения шнека, после чего запускает процесс печати.

5. Контроль в процессе печати. В ходе печати осуществляется непрерывный мониторинг состояния смеси. Измерение $P_{пл}$ производится не реже одного раза в 15 минут, а также после каждой загрузки новой порции смеси. При смещении показателя пластичности в соседний поддиапазон оператор (или автоматический контроллер) корректирует режимы печати в соответствии с «Картой» параметров, не прерывая процесс. Если значение $P_{пл}$ выходит за границы рабочего диапазона, печать приостанавливается, состав смеси корректируется или смесь заменяется. Все изменения режимов и результаты измерений фиксируются в «Журнале производства работ».

6. Завершение цикла. По окончании печати выполняется визуально-измерительный контроль геометрии готового изделия. Результаты контроля, а также все зафиксированные параметры процесса документируются в «Журнале производства работ», что обеспечивает прослеживаемость качества и накопление данных для дальнейшего совершенствования технологии.

На основании промышленной апробации для реализации предложенного алгоритма разработаны соответствующие три технологических регламентирующих документа, основное содержание которых охарактеризовано ниже. Полный текст документов представлен в Приложениях Н, О, П.

1. «Инструкция подготовки CAD-моделей изделий для строительной 3D-печати». Инструкция устанавливает порядок создания, верификации и

подготовки цифровых моделей строительных изделий к аддитивному производству на строительном 3D-принтере. Документ регламентирует последовательность действий от разработки твердотельной геометрии в программном комплексе SolidWorks (с экспортом в формат 3MF) до формирования финального управляющего кода, пригодного для загрузки в систему управления принтером.

Инструкция включает следующие основные этапы:

- проверку геометрии CAD-модели на целостность (замкнутость, отсутствие вырожденных граней и самопересечений) с учётом ограничений, накладываемых крупностью заполнителя бетонной смеси и минимально допустимым радиусом кривизны траектории сопла;
- послойное разбиение в слайсере SuperSlicer с назначением высоты слоя, диаметра сопла, скорости линейного перемещения и частоты вращения шнека, а также выбор режима укладки (классический послойный или «ваза»);
- постобработку сгенерированного G-кода (удаление команд, не поддерживаемых системой управления «PUMOTIX») и визуальную верификацию траектории в программе NC Corrector V4.0;
- оценку технологической пригодности подготовленной модели к печати на конкретном оборудовании.

Для каждого этапа предусмотрены соответствующие локальные документы: протокол верификации CAD-модели, карта параметров слайсинга, протокол проверки и адаптации G-кода, акт проверки модели на технологичность.

2. «Методика измерения пластической прочности смесей, готовых к употреблению в технологии строительной 3D печати». Инструкция определяет методику оперативного измерения пластической прочности ($P_{пл}$) цементных смесей, готовых к употреблению, с помощью разработанного пластометра, а также метод пенетрации с цилиндрическим плунжером.

Инструкция описывает две модификации прибора и соответствующие методики измерений:

- ручной (компактный) пластометр - предназначен для экспресс-контроля непосредственно на строительной площадке, в том числе без отбора

пробы (измерение в бункере-накопителе или свежееуложенном слое); погружение индентора осуществляется оператором вручную, а расчёт $R_{пл}$ выполняется автоматически;

- автоматизированный пластометр с шаговым двигателем предназначен для заводских лабораторий; обеспечивает постоянную скорость внедрения индентора (2 мм/с), автоматический расчёт и отображение максимального значения $R_{пл}$ на дисплее, а также сохранение результатов.

Приборы оснащены сменными насадками: коническими (углы 30°, 45°, 60°; высота 20 мм и 30 мм) и цилиндрическими плунжерами (диаметры 5-40 мм). Выбор насадки и её параметров осуществляется через встроенное программное меню.

Регламентированы процедуры отбора пробы (масса не менее 150 г, заполнение стандартной формы-кольца Ø100×50 мм), количество параллельных определений (не менее 6), правила отбраковки выбросов (более 15% от среднего) и усреднения результатов. Инструкция также содержит указания по допустимой периодичности контроля в процессе печати (не реже одного раза в 15 мин, а также после каждой загрузки новой партии смеси) и порядку действий при выходе измеренного значения $R_{пл}$ за границы рабочего диапазона.

3. «Инструкция по изготовлению строительных изделий методом 3D-печати». Инструкция устанавливает порядок выполнения технологических операций при строительной 3D-печати изделий из цементных смесей с адаптивным управлением режимами на основе непрерывного контроля пластической прочности $R_{пл}$. Документ охватывает все стадии производственного цикла: от входного контроля смеси и подготовки управляющей программы до завершения печати и приёмки готового изделия.

Основные этапы, регламентированные инструкцией:

- входной контроль смеси - измерение ($R_{пл}$) пластометром, установление допустимого рабочего диапазона путём варьирования водоцементного соотношения до достижения оптимальных значений пластичности и формоустойчивости;

- выбор режима печати - на основе фактического значения $P_{пл}$ смеси, определённого после её приготовления, по интервалам, полученным в результате CFD-моделирования для изделия заданной геометрии; параметры режима включают скорость перемещения экструдера, высоту слоя, частоту вращения шнека экструдера и диаметр сопла;

- предпечатный контроль - повторное измерение $P_{пл}$ непосредственно перед печатью и окончательный выбор поддиапазона уставок; при выходе за первично измеренный диапазон производится корректировка состава смеси;

- печать с непрерывным мониторингом - периодический (каждые 15 мин, а также при смене партии смеси) контроль $P_{пл}$ в бункере или на свежееуложенном слое; при смещении показателя в соседний диапазон - переход на соответствующий набор уставок; при выходе за границы рабочего диапазона - приостановка печати и корректировка/замена смеси;

- приёмка готового изделия - визуально-измерительный контроль геометрии, оформление акта приёмки (либо акта брака с анализом причин дефектов) и регистрация всех параметров процесса в Журнале производства работ.

4.3 Оценка эффективности и внедрение разработок

Испытания опытно-промышленного 3D-принтера «КЕЙКОД», изготовленного в соответствии с требованиями Свидетельства на секрет производства (ноу-хау) №2022001 [88] «Технологический комплекс для строительной 3D-печати (см. Прил. Б), позволили установить следующее.

Технические риски в основном сняты, 3D-принтер «KEYCODE» обеспечивает изготовление, перекачку, экструзию высоковязких смесей, качественную безопалубочную печать. Результаты печати подтверждают (см. табл. 4.1), что достигнуты ключевые характеристики технологии; техническая спецификация системы готова и достаточна для тиражирования технологии.

Сравнение характеристик разработанной модели опытно-промышленного 3D-принтера с аналогами представлено в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Сравнение 3D-принтеров

Разработчик-производитель	Авторский коллектив - ООО «KEYCODE»	Россия, «АМТ» СпецАвиа	Россия, «SCARA-кинематика»	Франция	Италия	США
Тип принтера	Портальный 4-х опорный	Портальный 4-х опорный	Одноопорный	Портальный 4-х опорный	Дельта	Портальный
Модель принтера	Крафер-У	«АМТ» S-6044	Lerto	Mini Printer	Delta WASP 3MT CONCRETE	ICON Vulcan II
Область печати ширина×длина×высота, м	2 × 3 × 1	3,5 × 3,1 × 1	2,4 × 2,4 × 4	0,6 × 0,5 × 0,6	1 × 1 × 1	11,13 × ∞ × 3,2
Точность позиционирования, мм	±2	±2	±2	±1,5	±1,5	±1,5
Скорость печати, м/с	10	6,3	3	7,5	20	5-10
Производительность принтера, м³/ч	3,6	0,6	3,6	Нет данных	1,3	Нет данных
Габаритные размеры принтера (длина, ширина, высота), м	3 4 3,5	4 4 3,6	2,4 1,2 1,6	2,1 1,8 2,1	5,5 2,5 3,6	Нет данных
Энергопотребление, кВт	7	4,5	3	-	1,5	Нет данных
Трудоемкость обслуживания (количество операторов)	2	2	1	2	2	Нет данных
Стоимость оборудования, руб.	3 970 000	2 100 000	4 500 000	Нет данных	5 549 000	Нет данных

Таким образом, разработанная модель опытно-промышленного 3D-принтера имеет следующие конструктивные преимущества перед аналогами (см. табл. 4.4):

- система перемешивания и подачи смеси обеспечивает возможность приготовления и перекачки высоковязких, малотекучих смесей;
- система экструзии отличается возможностью регулирования давления и скорости вращения шнека, в результате обеспечивается возможность синхронизации системы экструзии и системы подачи в зависимости от расхода смеси;
- модульность рельс позволяет увеличивать длину зоны печати;
- конструкция рамы позволяет доукомплектовать ее дополнительными механизмами (например, для финишной отделки, армирования изделий).

Эффективность разработанной конструкции 3D-принтера оценивалась по критерию $\frac{P}{3} \rightarrow \max$. При этом рассчитывались частный показатель экономической эффективности - фондоотдача (капиталоотдача) и показатель технологической эффективности - съем продукции с 1 м² производственной площади.

Для расчета фондоотдачи (капиталоотдачи) использовалась известная формула:

$$FO = \frac{B}{OF} \quad (4.1)$$

где B - годовой объем выпущенной продукции в стоимостном выражении, р.; OF - стоимость основных фондов, р.

При оценке эффективности 3D-принтеров стоимость годового объема выпущенной продукции (B) определялась на примере малых архитектурных форм (МДФ), а стоимость основных фондов (OF) соответствовала цене принтера на момент проведения расчетов.

Расчеты показали, что, несмотря на более высокое энергопотребление по сравнению с другими принтерами, разработанный принтер является самым эффективным по фондоотдаче (таблица 4.5) и сопоставимым по съему продукции с 1 м² производственной площади [133-135].

Таблица 4.5 – Характеристики 3D-принтеров и результаты расчета их эффективности

Разработчик-производитель	Авторская разработка - ООО «KEYCODE»	Россия, «АМТ» СпецАвиа	Россия, «SCARA-кинematика»	Италия
Характеристики принтеров, используемые в расчете эффективности разработок				
Готовая производительность принтера, тыс. м ³	13,8	2,3	13,8	4,9
Область печати (ширина×длина×высота), м ²	2 × 3 × 1	3,5 × 3,1 × 1	2,4 × 2,4 × 4	1 × 1 × 1
Цена принтера, тыс. р.	3970	2100.	4500	5549
Показатели эффективности авторских разработок				
Фондоотдача (капиталоотдача) при производстве МАФ, р./р.	240	60	180	54

Пластометр для контроля качества смеси специально разработан для вязкоупругих смесей для 3D-печати, поэтому гарантирует контроль пластической прочности и в диапазоне 0,4-4,0 кПа, что не обеспечивают существующие аналоги [137-140]. Устройство полностью автоматизировано, что исключает субъективный фактор при проведении измерений, а также снижает время и трудоемкость замеров пластичности смеси. Помимо этого, авторский пластометр отличается следующими преимуществами (таблица 4.6):

- оснащен сменными насадками, что делает его универсальным и позволяет применять для контроля характеристик различных неорганических смесей;
- позволяет производить автоматический обсчет результатов измерений; обладает высокой точностью и стабильностью измерений за счет автоматизированной передачи усилия на смесь.

Таблица 4.6 – Сравнение пластометров

Критерий сравнения	Аналоги				Авторский пластометр
	Патент РФ SU756274A1	Патент РФ SU1661626A1 (1991)	Патент РФ RU2782675C1)	Патент РФ SU1141309A1	
Принцип действия	Проникновение раздвижных лопаток вручную	Проникновение спиралевидного конуса-индентора	Ударное воздействие коническим стержнем	Статическое/медленное нагружение индентором	Статическое нагружение индентором с датчиком усилия
Управление и передача усилия	Ручное	Ручное	Ручное	Ручное	Автоматизированное
Сбор и обработка данных	Ручной ввод, визуальный контроль	Ручной ввод, визуальный контроль	Ручной ввод, визуальный контроль	Ручной ввод данных с датчиков	Цифровая передача на плату управления и дисплей
Измеряемые параметры	Глубина погружения за время (пластичность)	Глубина погружения (вязкость/твёрдость)	Глубина от удара (ударная вязкость/сопротивление)	Зависимость «деформация-нагрузка»	Усилие при заданной деформации (пластичность)
Подготовка образца	Трудоемкая	Сложная установка	Трудоемкая	Трудоемкая	Простая
Автоматизация измерений	Отсутствует (секундомер)	Отсутствует (визуальный отсчет)	Частичная (счетчик ударов)	Частичная (датчик перемещений, задатчик)	Есть (датчик усилия, плата расшифровки)
Универсальность (сменные насадки)	Есть (раздвижные лопатки)	Нет (фиксированный конус)	Нет (фиксированный конический стержень)	Возможна смена индентора	Есть (сменные конуса)

Прогнозируемый эффект от применения пластометра и рекомендованной процедуры производственного контроля (см. Прил. О) связывается с экономией временных ресурсов, снижением затрат на отделку поверхности, снижением потерь от брака (таблица 4.7). Прогноз подтвержден при внедрении разработанной процедуры и средства контроля в цехе 3D-печати ООО «БетоникАРТ». Согласно данным ООО «БетоникАРТ» (см. Прил. Л) использование разработанных процедур и средств контроля позволило оперативно регулировать качество смеси и подстраивать ее под геометрические параметры конечного изделия. В результате ООО «БетоникАРТ» в 2025 г. удалось повысить в

1,5 раза объем выпускаемой продукции в единицу времени, снизить потери от брака на 20%. Результатом явилось увеличение валовой прибыли ООО «БетоникАРТ» на 320 тыс. рублей в год.

Таблица 4.7 – Эффективность применения разработанного пластометра для оценки технологических характеристик смесей для 3D-печати

Метод	Элементы новизны, обеспечивающие эффективность применения	Рекомендованные границы регулирования технологических характеристик смесей	Последствия для качества процесса печати и продукции при выходе за границы регулирования технологических характеристик смесей	Ожидаемый эффект от применения
Оценка пластичности	Автоматизированный расчет измерений, сменные насадки, простота конструкции, низкая стоимость	Пластическая прочность $R_{пл} = 0,4-2,8$ кПа	$\leq 1,1$ кПа - расплыв слоев $\geq 2,8$ кПа - трещиноватость слоев, разрывы между слоями	Снижение дефектности поверхности изделия, отсутствие затрат на отделку
				Снижение брака, отсутствие затрат на повторную печать при обрушении конструкции

Разработанная методика цифрового моделирования процесса 3D-печати внедрена в производственном цехе ООО «КЕЙКОД» (см. Прил. Л). создание цифровых двойников позволило повысить эффективность и производительность выпускаемых компанией ООО «КЕЙКОД» строительных 3D-принтеров.

Подготовленные в соответствии с разработанной методикой CAD-модели малых архитектурных форм и строительных изделий прошли независимую экспертизу пригодности к печати. Экспертиза выполнена АНО «МИР» (см. Прил. М) и подтверждает соответствие моделей технологическим возможностям строительного 3D-принтера, а также корректность предложенной последовательности действий при подготовке цифровых моделей.

Таким образом, внедрение прикладных результатов диссертационного исследования позволило повысить эффективность производственного цикла строительной 3D-печати за счёт:

- сокращения времени на подготовку управляющих программ и снижения числа ошибок на этапе цифровой подготовки;
- обеспечения объективного оперативного контроля пластичности смеси непосредственно в процессе печати, исключающего зависимость от субъективной оценки оператора;
- своевременной корректировки технологических режимов при изменении свойств смеси, что минимизирует риск появления дефектов и обеспечивает стабильность качества возводимых конструкций.

4.4 Выводы по главе 4

1. По результатам промышленной апробации результатов экспериментальных исследований разработаны рекомендации по выбору технологических режимов в зависимости от пластичности смеси и геометрии возводимого объекта. Рекомендации задают начальные значения управляющих параметров, гарантирующие устойчивое послойное возведение конструкций из цементной смеси с известным показателем пластической прочности.

2. Для выбора рациональных режимов и предотвращения потери устойчивости в процессе печати разработан алгоритм, объединяющий этапы входного контроля, проектную и технологическую стадии производственного цикла 3D-печати, готовый к внедрению в систему управления промышленным строительным 3D-принтером.

3. Испытания опытно-промышленного 3D-принтера «KEYCODE», изготовленного в соответствии с обоснованными в результате работы техническими требованиями, показали, что обеспечивается изготовление, перекачка, экструзия высоковязких смесей, качественная безопалубочная печать. Результаты печати подтверждают, что достигнуты ключевые характеристики технологии, техническая спецификация системы готова и достаточна для тиражирования технологии.

4. Разработаны технологические инструкции, регламентирующие ключевые этапы производственного цикла строительной 3D-печати:

1) «Инструкция подготовки CAD-моделей изделий для строительной 3D-печати»;

2) «Методика измерения пластической прочности смесей, готовых к употреблению в технологии строительной 3D-печати»;

3) «Инструкция по изготовлению строительных изделий методом 3D-печати».

5. Эффективность предложенных решений подтверждена внедрением в производственный процесс компаний ООО «БетоникАРТ» и ООО «КЕЙКОД». За счет совершенствования методов моделирования, оперативного контроля и управления процессом строительной 3D-печати указанным компаниям удалось повысить в 1,5 раза объем выпускаемой продукции в единицу времени, снизить потери от брака на 20%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования.

1. Концепция исследований заключается в создании единого цикла управления процессом 3D-печати, включая моделирование устойчивости 3D-печатных структур на проектной стадии, методы контроля и регулирования процесса на технологической стадии. На проектной стадии прогнозирование обеспечения геометрического соответствия и устойчивости 3D-печатной структуры заданной геометрии основано на численном моделировании в расчетном CFD-комплексе, реализующем методы вычислительной гидродинамики. Для управления технологической стадией 3D-печати в процессе экструзии и послойной укладки определены критериальные реологические характеристики вязко-пластичных смесей и соответствующие им параметры режимов печати.

2. Для решения задач производственного контроля разработаны два устройства (пластометра) для измерения технологических свойств неорганических смесей для строительной 3D-печати. В основу положен принцип оценки пластичности через сопротивление внедрению конического индентора. Приборы полностью автоматизированы, диапазон измерений пластической прочности составляет $P_{пл} = 0,4-4,0$ кПа, что полностью перекрывает область технологически значимых состояний смеси для строительной 3D-печати.

3. В результате экспериментальных исследований определены требования к значениям реологических характеристик смесей, обеспечивающих бездефектность экструзионного слоя и устойчивость 3D-печатных строительных изделий, к которым отнесены: статическая вязкость 300-350 Па·с; динамическая вязкость 20-80 Па·с, статический предел текучести 240-260 Па; предел текучести (по Бингаму) 30-90 Па; оценка предела пластичности в условиях действия нормальных напряжений 1,5-2,2 кПа. Соответствующий данным реологическим характеристикам технологический диапазон значений пластической прочности смеси составляет $P_{пл} = 1,1-2,4$ кПа.

4. На основании результатов численного моделирования и их экспериментальной верификации установлено, что реологическая модель Хершеля-Балкли адекватно аппроксимирует экспериментальные зависимости вязкости пластичной системы от скорости деформации и обеспечивает достоверное прогнозирование геометрии печатных слоёв и устойчивости модельных 3D-печатных объектов. Получено уравнение линейной регрессии между технологическим показателем пластичности $R_{пл}$ и оценкой предела пластичности при сдавливании $K_i(I)$. Полученные данные позволяют интегрировать результаты численного моделирования и оперативного контроля при обосновании режимов печати 3D-печати с учетом фактического реологического поведения смесей, готовых к употреблению.

5. На основании результатов численного моделирования, экспериментальных исследований и промышленной апробации разработаны рекомендации по выбору технологических режимов 3D-печати. Рекомендации задают начальные значения управляющих параметров процесса, гарантирующие устойчивое послойное возведение конструкций из цементной смеси с известным показателем пластической прочности:

1) диапазон реологических параметров смеси: статическая вязкость $\eta_0 = 360-390 \text{ Па}\cdot\text{с}$, динамическая вязкость $\eta = 15-28 \text{ кПа}\cdot\text{с}$, предел текучести $\tau_{кл} = 40-105 \text{ Па}$, оценка предела пластичности. (при сдавливании) $K_i(I) = 0,8-1,2 \text{ кПа}$;

2) граничные значения входных параметров для численного моделирования: предел текучести $\tau_0 = 250-750 \text{ Па}$; индекс степенного закона модели Хершеля-Балкли $n = 0,4-0,85$; коэффициент вязкости $K = 80-350 \text{ Па}\cdot\text{с}^n$;

3) диапазон регулирования параметров процесса 3D-печати - диаметр сопла 20-30 мм; скорость подачи материала $U = 40-80 \text{ см}^3/\text{с}$; скорость движения сопла $V = 50-83 \text{ мм/с}$; параметр относительной скорости перемещения сопла $V/U = 1,57-2,61$.

6. Разработана комплексная система контроля и регулирования проектной и технологической стадии 3D-печати; практические предложения, готовые

к внедрению в систему управления промышленным строительным 3D-принтером, включая процедуру подготовки CAD-моделей строительных изделий; методику численного моделирования процесса, методику контроля технологических характеристик смесей, процедуру управления процессом печати на строительном 3D-принтере.

7. Разработанные методики и технические средства внедрены в производственный процесс ООО «БетоникАРТ» и ООО «КЕЙКОД». Их применение позволило повысить компаниям производительность, снизить потери от брака и обеспечить стабильное качество возводимых конструкций за счёт усовершенствованных методик моделирования и адаптивного управления режимами печати.

Рекомендации по использованию результатов работы.

Технологические инструкции по контролю качества смесей, разработанное устройство измерения пластичности рекомендуются к использованию при организации контроля качества при производстве смесей в заводских условиях, а также для контроля строительного процесса 3D-печати.

Разработанный алгоритм контроля и технологические инструкции по подготовке CAD-моделей, по управлению печатью на строительном 3D-принтере рекомендуются к использованию в системе управления производственным циклом аддитивных строительных технологий.

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с разработкой методов и средств непрерывного автоматизированного цикла контроля и управления процессом 3D-печати, основанных на автоматизированном мониторинге качества смеси и строительных изделий и обратной связи с параметрами процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rehman A., Jung Hoon Kim. 3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics // *Materials*. - 2021. - Vol. 14. - Art. 3800.
2. Paul S.C., Tay Y.W.D., Panda B., Tan M.J. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. - 2018. - Vol. 18, № 1. - P. 311-319.
3. Roussel N., Lanos C. Plastic Fluid Flow Parameters Identification Using a Simple Squeezing Test // *Applied Rheology*. - 2003. - Vol. 13, № 3. - P. 3-5.
4. Toutou Z., Roussel N., Lanos C. The squeezing test: a tool to identify firm cement based material's rheological behaviour and evaluate their extrusion ability // *Cement and Concrete Research*. - 2005. - Vol. 35, № 10. - P. 1891-1899.
5. Souza M.T., Ferreira I.M., Guzi de Moraes E. [et al.] 3D printed concrete for large scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects // *Journal of Building Engineering*. - 2020. - Vol. 32. - Art. 101833.
6. Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Виды дефектов бетонов и растворов в технологии аддитивного строительного производства // *Известия КГАСУ*. - 2024. - № 1 (67). - С. 107-116. - DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.11. - EDN OJRGGB.
7. Casagrande L., Esposito L., Menna C., Asprone D., Auricchio F. Mechanical Characterization of Cement Based Mortar Used in 3DCP Including Early Age Creep Effects // *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (DC 2020)*. - RILEM Bookseries, vol. 28. - Springer, Cham, 2020. - P. 407-416.
8. Адамцевич А.О., Пустовгар А.П., Адамцевич Л.А. Аддитивное строительное производство: особенности применения технологии // *Промышленное и гражданское строительство*. - 2023. - № 7. - С. 70–78.
9. Liu Z., Li M., Weng Y., Qian Y., Wong T.N., Tan M.J. Modelling and parameter optimization for filament deformation in 3D cementitious material printing using support vector machine // *Composites Part B: Engineering*. - 2020. - Vol. 193. - Art. 108018.

10. Wolfs R.J.M., Salet T.A.M., Roussel N. Filament geometry control in extrusion based additive manufacturing of concrete: the good, the bad and the ugly // *Cement and Concrete Research*. - 2021. - Vol. 150. - Art. 106615.
11. Hosseini E., Zakertabrizi M., Korayem A.H., Xu G. A novel method to enhance the interlayer bonding of 3D printing concrete: an experimental and computational investigation // *Cement and Concrete Composites*. - 2019. - Vol. 99. - P. 112-119.
12. Jayathilakage R., Rajeev P., Sanjayan J.G. Yield stress criteria to assess the buildability of 3D concrete printing // *Construction and Building Materials*. - 2020. - Vol. 240. - Art. 117989.
13. Nguyen Van V., Panda B., Zhang G., Nguyen Xuan H., Tran P. Digital design computing and modelling for 3 D concrete printing // *Automation in Construction*. - 2021. - Vol. 123. - Art. 103529.
14. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: numerical modelling and experimental testing // *Cement and Concrete Research*. - 2018. - Vol. 106. - P. 103-116.
15. Wolfs R.J.M., Suiker A.S.J. Structural failure during extrusion based 3D printing processes // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2019. - Vol. 104. - P. 565-584.
16. Vantuyghem G., Ooms T., De Corte W. FEM modelling techniques for simulation of 3D concrete printing // *Proceedings of the Fib Symposium 2020: Concrete Structures for Resilient Society*. - 2020. - P. 964-972.
17. Collins P., Van Helvoort S., Khimshiasvili G., Marsella A. Chapter 1 Prediction of Print Success for Concrete 3D Printing. - (n.d.). - P. 1-27.
18. Andersen S., da Silva W.R.L., Paegle I., Nielsen J.H. Numerical Model Describing the Early Age Behavior of 3D Printed Concrete - Work in Progress // *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (DC 2020)*. - RILEM Bookseries, vol. 28. - Springer, Cham, 2020. - P. 175-184.
19. Panda B., Lim J.H., Tan M.J. Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction // *Composites Part B: Engineering*. - 2019. - Vol. 165. - P. 563-571.

20. Reiter L., Wangler T., Roussel N., Flatt R.J. The role of early age structural build up in digital fabrication with concrete // Cement and Concrete Research. - 2018. - Vol. 112. - P. 86-95.

21. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research // Cement and Concrete Research. - 2018. - Vol. 112. - P. 37-49.

22. Roussel N., Lanos C., Bessaies Bey H. [et al.] Recent advances on yield stress and viscosity of fresh concrete: From measurements to processing // Cement and Concrete Research. - 2023. - Vol. 170. - Art. 107169.

23. Perrot A., Rangeard D., Pierre A. Structural built up of cement based materials used for 3D printing extrusion techniques // Materials and Structures. - 2016. - Vol. 49. - P. 1213-1220.

24. Lim S., Buswell R.A., Le T.T., Austin S.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Developments in construction scale additive manufacturing processes // Automation in Construction. - 2012. - Vol. 21. - P. 262-268.

25. Panda B., Tan M.J. Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing // Ceramics International. - 2018. - Vol. 44, № 9. - P. 10258-10265.

26. Мухаметрахимов Р.Х., Лукманова Л.В. Влияние подвижности цементно песчаного раствора на качество затвердевшего композита, полученного методом 3D печати // Construction of Unique Buildings and Structures. - 2021. - № 1 (94). - Art. 9404. - DOI: 10.4123/CUBS.94.4. - EDN RWDNPD.

27. Мухаметрахимов Р.Х., Лукманова Л.В. Влияние портландцементов с различным минералогическим составом на основные свойства композитов, сформированных методом послойного экструдирования (3D печати) // Известия КГАСУ. - 2021. - № 2 (56). - С. 37-49. - DOI: 10.52409/20731523_2021_2_37. - EDN DXDYSR.

28. Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B. Cementitious materials for construction scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture // Construction and Building Materials. - 2017. - Vol. 145. - P. 639-647.

29. Mechtcherine V., Nerella V.N. 3D concrete printing by selective deposition - Requirements for fresh concrete and testing // *Beton und Stahlbetonbau*. - 2019. - Vol. 114, № 1. - P. 24-32.
30. Jayathilakage R., Rajeev P., Sanjayan J. Yield stress criteria to assess the buildability of 3D concrete printing // *3D Concrete Printing Technology*. - Butterworth Heinemann, 2019. - Chapter 7. - P. 131-157.
31. Zhang H., Hao L., Zhang S., Xiao J., Poon C.S. Intelligent real time quality control for 3D printed concrete with near nozzle secondary mixing // *Automation in Construction*. - 2024. - Vol. 160. - Art. 105315.
32. Harbouz I., Yahia A., Rozière E., Loukili A. Printing quality control of cement based materials under flow and rest conditions // *Cement and Concrete Composites*. - 2023. - Vol. 139. - Art. 104965.
33. Panda B., Unluer C., Tan M.J. Investigation of the rheology and strength of geopolymers mixtures for extrusion based 3D printing // *Cement and Concrete Composites*. - 2018. - Vol. 94. - P. 307-314.
34. Adamtsevich A., Pustovgar A., Adamtsevich L., Markov Y. 3D Concrete Printing: A Study of Printed Structures Durability // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2025. – Vol. 21, № 2. – P. 200–219.
35. Адамцевич А.О., Пустовгар А.П., Адамцевич Л.А. [и др.] Исследование особенностей работы бетонных конструкций, изготовленных с применением технологии аддитивного строительного производства // *Строительные материалы*. – 2023. – № 7. – С. 70–78.
36. Rahul A.V., Santhanam M., Meena H., Ghani Z. 3D printable concrete: Mixture design and test methods // *Cement and Concrete Composites*. - 2019. - Vol. 97. - P. 13-23.
37. Nerella V.N., Krause M., Mechtcherine V. Direct printing test for buildability of 3D printable concrete considering economic viability // *Automation in Construction*. - 2020. - Vol. 109. - Art. 102986.

38. Ivanova I., Mechtcherine V. Effects of volume fraction and surface area of aggregates on the static yield stress and structural build up of fresh concrete // *Materials and Structures*. - 2020. - Vol. 53. - Art. 102.

39. Kruger J., Cho S., Zeranka S., van Zijl G.P.A.G. 3D concrete printing: A rheology based framework for buildability assessment // *Cement and Concrete Research*. - 2021. - Vol. 140. - Art. 106292.

40. Ma G., Li Z., Wang L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing // *Construction and Building Materials*. - 2018. - Vol. 162. - P. 613-627.

41. Panda B., Paul S.C., Mohamed N.A.N., Tay Y.W.D., Tan M.J. Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymers mortar // *Measurement*. - 2018. - Vol. 113. - P. 108-116.

42. Van Der Putten J., Deprez M., De Schutter G., Van Tittelboom K. Effect of print parameters on the mechanical properties of 3D printed concrete // *Cement and Concrete Composites*. - 2020. - Vol. 109. - Art. 103569.

43. Comminal R., da Silva W.R.L., Andersen T.J., Stang H., Spangenberg J. Modelling of 3D concrete printing based on computational fluid dynamics // *Cement and Concrete Research*. - 2020. - Vol. 138. - Art. 106256.

44. Nerella V.N., Hempel S., Mechtcherine V. Effects of layer interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion based 3D printing // *Construction and Building Materials*. - 2019. - Vol. 205. - P. 586-601.

45. Tay Y.W.D., Ting G.H.A., Qian Y., Panda B., He L., Tan M.J. Time gap effect on bond strength of 3D printed concrete // *Virtual and Physical Prototyping*. - 2019. - Vol. 14, № 1. - P. 104-113.

46. Lao W., Li H., Liu G., Tan K.H. Effect of nozzle stand off distance on interlayer bond strength of 3D printed concrete // *Additive Manufacturing*. - 2023. - Vol. 67. - Art. 103477.

47. Ma G., Salman N.M., Wang L., Wang F. A novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing // *Construction and Building Materials*. - 2020. - Vol. 244. - Art. 118305.

48. Comminal R., Leal da Silva W.R., Andersen T.J., Stang H., Spangenberg J. Influence of processing parameters on the layer geometry in 3D concrete printing: Experiments and modelling // *Cement and Concrete Research*. - 2021. - Vol. 145. - Art. 106456.
49. Reinold J., Nerella V.N., Mechtcherine V., Meschke G. Extrusion process simulation and layer shape prediction during 3D concrete printing using the Particle Finite Element Method // *Additive Manufacturing*. - 2022. - Vol. 57. - Art. 102968.
50. Sun Y., He L., Li H., Tan K.H. Synchronization of extrusion rate and printing speed for quality control in 3D concrete printing // *Additive Manufacturing*. - 2023. - Vol. 78. - Art. 103817.
51. Mei S. M., Zhang M. Y., Li Z. W., He B. G., Song J. Q. Forming quality evaluation of 3D printed lines and layers with cement based materials under different process parameters // *Rapid Prototyping Journal*. - 2025. - Vol. 31, № 7. - P. 1567-1580.
52. Keita E., Bessaies Bey H., Zuo W., Belin P., Roussel N. Weak bond strength between successive layers in extrusion based additive manufacturing: a review // *Cement and Concrete Research*. - 2019. - Vol. 123. - Art. 105788.
53. Van Der Putten J., De Schutter G., Van Tittelboom K. Surface modification as a technique for improving inter layer bonding strength in 3D printed cementitious materials // *Cement and Concrete Composites*. - 2019. - Vol. 100. - P. 131-138.
54. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F., Thorpe T. Hardened properties of high performance printing concrete // *Cement and Concrete Research*. - 2012. - Vol. 42, № 3. - P. 558-566.
55. Marchment T., Sanjayan J., Xia M. Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification // *Materials & Design*. - 2019. - Vol. 169. - Art. 107684.
56. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion // *Cement and Concrete Research*. - 2019. - Vol. 119. - P. 132-140.
57. Мухаметрахимов Р.Х., Рахимов Р.З., Бурьянов А.Ф., Зиганшина Л.В. Исследование прочности сцепления слоёв в технологии 3D печати бетоном //

Строительные материалы. - 2025. - № 7. - С. 32-37. - DOI: 10.31659/0585 430X 2025 837 7 32 37. - EDN GQVOKW.

58. Mechtcherine V., Bos F.P., Perrot A., da Silva W.R.L., Nerella V.N., Roussel N., Leal da Silva W.R., Wolfs R.J.M., Buswell R.A., De Schutter G. Digital concrete: opportunities and challenges // Cement and Concrete Research. - 2020. - Vol. 136. - Art. 106183.

59. Van Overmeir A.L., Van Tittelboom K., De Schutter G. Influence of the printing direction and nozzle standoff distance on the bond strength of 3D printed concrete // Materials and Structures. - 2021. - Vol. 54. - Art. 86.

60. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F., Thorpe T. Mix design and fresh properties for high performance printing concrete // Materials and Structures. - 2012. - Vol. 45. - P. 1221-1232.

61. Bos F.P., Wolfs R.J.M., Ahmed Z., Salet T.A.M. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing // Virtual and Physical Prototyping. - 2016. - Vol. 11, № 3. - P. 209-225.

62. Kazemian A., Yuan X., Meier R., Cochran E., Khoshnevis B. Performance based testing of Portland cement concrete for construction scale 3D printing // 3D Concrete Printing Technology. - Butterworth Heinemann, 2019. - P. 13-35.

63. Roussel N. Rheological requirements for printable concretes // Cement and Concrete Research. - 2018. - Vol. 112. - P. 76-85.

64. De Schutter G., Lesage K., Mechtcherine V., Nerella V.N., Habert G., Agusti Juan I. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials // Cement and Concrete Research. - 2018. - Vol. 112. - P. 25-36.

65. He L., Chow W.T., Li H., Tan K.H. Real time monitoring and feedback control of 3D concrete printing using laser profile scanner // Additive Manufacturing. - 2022. - Vol. 60. - Art. 103267.

66. Wangler T., Roussel N., Bos F.P., Salet T.A.M., Flatt R.J. Digital concrete: a review // Cement and Concrete Research. - 2019. - Vol. 123. - Art. 105780.

67. Rahul A.V., Santhanam M. Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates // *Cement and Concrete Composites*. - 2020. - Vol. 109. - Art. 103570.

68. Ji G., Xiao J., Duan Z., Ma G. Influence of time gap between the end of mixing and the start of printing on the mechanical properties of 3D printed concrete // *Construction and Building Materials*. - 2021. - Vol. 291. - Art. 123298.

69. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Зиганшина Л.В. Совершенствование аддитивного строительного производства повышением адгезии слоёв при длительных перерывах в процессе 3D печати // *Известия КГАСУ*. - 2024. - № 1 (67). - С. 127-134. - DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.13. - EDN ULXEQB.

70. Perrot A., Rangeard D., Nerella V.N., Mechtcherine V. Extrusion of cement based materials - an overview // *RILEM Technical Letters*. - 2018. - Vol. 3. - P. 91-97.

71. Nerella V.N., Iqbal A., Mechtcherine V. A systematic approach for assessing the printability of cement based materials // *Cement and Concrete Composites*. - 2022. - Vol. 129. - Art. 104466.

72. Lee H., Kim J. H., Sim S. H. 3D concrete printing: a systematic review of process parameters and their effects on hardened properties // *Journal of Building Engineering*. - 2021. - Vol. 44. - Art. 102647.

73. Kruger J., du Plessis A., van Zijl G.P.A.G. An investigation into the porosity of 3D printed concrete // *Construction and Building Materials*. - 2020. - Vol. 264. - Art. 120665.

74. Bester F., van den Heever M., Kruger J., van Zijl G.P.A.G. Time gap effect on the mechanical properties of 3D printed concrete // *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, Springer. - 2022. - P. 210-217.

75. Ребиндер П.А. Физико химическая механика дисперсных структур / П.А. Ребиндер. - Москва: Наука, 1979. - 384 с.

76. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия: издание официальное. - Москва: Стандартинформ, 2020. - 19 с.

77. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия: издание официальное. - Москва: Стандартинформ, 2015. - 12 с.

78. ГОСТ 26826-86. Мука известняковая (доломитовая). Технические условия: издание официальное. - Москва: Издательство стандартов, 1986. - 10 с.

79. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия: издание официальное. - Москва: Стандартинформ, 2012. - 11 с.

80. Патент № 2729085 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/04, В33У 70/00. Двухфазная смесь на основе цемента для композитов в технологии строительной 3D печати: № 2019133430: заявл. 21.10.2019: опубл. 04.08.2020 / Г.С. Славчева, О.В. Артамонова, М.А. Шведова, Е.А. Бритвина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». - 8 с.

81. Патент № 2729283 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/04, В33У 70/00. Строительная смесь для 3D печати: № 2019133420: заявл. 21.10.2019: опубл. 05.08.2020 / Г.С. Славчева, О.В. Артамонова, М.А. Шведова, Е.А. Бритвина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». - 8 с.

82. Славчева Г.С., Бритвина Е.А., Ибряева А.И. Строительная 3D печать: оперативный метод контроля реологических характеристик смесей // Вестник Инженерной школы ДВФУ. - 2019. - № 4 (41). - С. 134-143.

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

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

85. Славчева Г.С., Бритвина Е.А., Шведова М.А., Юров П.Ю. Влияние дозировки и гранулометрии наполнителей на показатели экструдирруемости смесей для 3D-печати // Строительные материалы. – 2022. – № 1–2. – С. 21–29. – DOI: 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-21-29. – EDN IRXARN.

86. Свидетельство на секрет производства (ноу-хау) № 2022001 «Технологический комплекс для строительной 3D-печати» / Славчева Г.С., Каракчи-Огли Д.Р., Юров П.Ю., Резанов А.А.; правообладатель ВГТУ. – Оpubл. 07.11.2022.

87. Руководство по эксплуатации ротационного вискозиметра «RHEOTEST 4.1». - Dresden: VEB MLW Medingen, 1989. - 32 с.

88. Roussel N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications // Cement and Concrete Research. - 2006. - Vol. 36, № 10. - P. 1797-1806.

89. Ребиндер П.А., Семененко Н.А. О методе погружения конуса для характеристики структурно механических свойств пластично вязких систем // Доклады Академии наук СССР. - 1949. - Т. 64, № 6. - С. 835-838.

90. Берней И.И. Исследование структурно механических свойств пластично вязких сред на конических пластометрах // Строительные материалы. - 1973. - № 7. - С. 45-47.

91. Бабенко, Д. С. Обоснование требований к номенклатуре и значениям технологических свойств смесей для аддитивных строительных технологий / Д. С. Бабенко // International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (MPCPE-2024) : сб. тр. V междунар. науч.-техн. конф. 23-25 апр. 2024 г., Владимир. - Владимир: Аркаим, 2024. - С. 22-30.

92. Slavcheva G., Artamonova O., Babenko D., Shvedova M. Visco-plastic properties regulation of 3D-printable cement mixtures // FEFU: School of Engineering Bulletin. – 2022. – № 3. – P. 64–80. – DOI: 10.24866/2227-6858/2022-3/64-80.

93. Slavcheva G.S., Artamonova O.V., Babenko D.S., Shvedova M.A. Studying the effect of modifying additives on the hydration and hardening of cement composites for 3D printing // Condensed Matter and Interphases. – 2023. – Vol. 25, № 1. – P. 112–124. – DOI: 10.17308/kcmf.2023.25/10979.

94. Moeini M.A., Hosseinpour M., Yahia A. Use of the shear curve approach for estimating the thixotropy of cement based materials // Cement and Concrete Research. - 2021. - Vol. 145. - Art. 106457.

95. Rahul A.V., Santhanam M., Meena H., Ghani Z. Mechanical characterization of 3D printable concrete // Construction and Building Materials. - 2019. - Vol. 227. - Art. 116710.

96. Kazemian A., Yuan X., Meier R., Khoshnevis B. A framework for performance based testing of fresh mixtures for construction scale 3D printing // *Construction and Building Materials*. - 2019. - Vol. 229. - Art. 116888.
97. Nair S.A.O., Panda B., Santhanam M. [et al.] A critical examination of the influence of material characteristics and process parameters on the quality of 3D printed structures // *Cement and Concrete Composites*. - 2021. - Vol. 124. - Art. 104253.
98. Van Der Putten J., De Schutter G., Van Tittelboom K. The effect of print parameters on the (micro)structure of 3D printed cementitious materials // *Cement and Concrete Research*. - 2019. - Vol. 122. - P. 166-178.
99. Gosselin C., Duballet R., Roux Ph. [et al.] Large scale 3D printing of ultra high performance concrete - a new processing route for architects and builders // *Materials & Design*. - 2016. - Vol. 100. - P. 102-109.
100. Slavcheva G. S., Levchenko A. V., Shvedova M. A., Karakchi-ogly D. R., Babenko D. S. Anisotropy in mechanical properties of 3D-printed layered concrete // *Magazine of Civil Engineering*. - 2024. - Vol. 17, № 3. - Art. 12708.
101. Yuan Q., Zhou D., Li B. [et al.] Effect of mineral admixtures on the structural build up of cement paste // *Construction and Building Materials*. - 2018. - Vol. 160. - P. 117-126.
102. Lloret Fritschi E., Wangler T., Gebhard L. [et al.] From smart dynamic casting to a growing family of digital casting systems // *Cement and Concrete Research*. - 2020. - Vol. 134. - Art. 106071.
103. Адамцевич А.О., Пустовгар А.П. Аддитивное строительное производство: исследование эффекта анизотропии прочностных характеристик бетона // *Строительные материалы*. – 2022. – № 1 – 2. – С. 30 – 36.
104. Spangenberg J., Roussel N., Hattel J.H. Flow induced particle migration in fresh concrete: A numerical study // *Cement and Concrete Research*. - 2012. - Vol. 42, № 4. - P. 633-641.
105. Sharma A., Chaudhary S. Time resolved rheological characterization of cement paste using a distinct shear protocol: quantifying thixotropic and hydration driven structuration // *Innovative Infrastructure Solutions*. - 2025. - Vol. 10. - Art. 10.

106. Márquez A., Varela H., Barluenga G. Rheology and early age evaluation of 3D printable cement limestone filler pastes with nanoclays and methylcellulose // Construction and Building Materials. - 2024. - Vol. 457. - Art. 139358.
107. Buswell R.A., Kinnell P., Xu J. [et al.] Inspection methods for 3D concrete printing // RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (DC 2020). - RILEM Bookseries, vol. 28. - Springer, Cham, 2020. - P. 790-803.
108. Nerella V.N., Beigh M.A.B., Fataei S., Mechtcherine V. Strain based approach for measuring structural build up of cement pastes in the context of digital construction // Cement and Concrete Research. - 2019. - Vol. 115. - P. 530-544.
109. Bos F.P., Wolfs R.J.M. A quality control framework for digital fabrication with concrete // RILEM Technical Letters. - 2023. - Vol. 8. - P. 106-112.
110. Comminal R., Spangenberg J., Hattel J.H. Numerical simulations of planar extrusion and fused filament fabrication of viscoplastic fluids // Additive Manufacturing. - 2018. - Vol. 22. - P. 700-711.
111. Paul S.C., van Zijl G.P.A.G., Tan M.J., Gibson I. A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research needs // Rapid Prototyping Journal. - 2018. - Vol. 24, № 4. - P. 784-798.
112. Buswell R.A., da Silva W.R.L., Bos F.P., Schipper H.R., Lowke D., Hack N., Kloft H., Mechtcherine V., Wangler T., Roussel N. A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete // Cement and Concrete Research. - 2020. - Vol. 134. - Art. 106068.
113. Юров П.Ю., Каракчи Огли Д.Р. Влияние технологических свойств цементной смеси на качество слоистых 3D печатных элементов // Вестник Инженерной школы ДВФУ. - 2025. - № 1 (62). - С. 139-154.
114. Славчева Г.С., Теличко В.Г., Юров П.Ю., Бабенко Д.С. Численное моделирование процесса строительной 3D-печати. Проблемы и методы решения // Строительные материалы. - 2025. - № 7. - С. 12–20. - DOI: 10.31659/0585-430X-2025-837-7-12-20. - EDN VSRDNZ.
115. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. - 1981. - Vol. 39, № 1. - P. 201-225.

116. Engmann J., Peck M. C., Wilson D. I. An experimental and theoretical investigation of the squeeze flow of a viscoplastic fluid // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. - 2005. - Vol. 129, № 2. - P. 81-97.
117. Sonebi M., Abdalqader A., Amziane S., Perrot A. A review of 3D concrete printing: materials, mix design, and challenges // *RILEM Technical Letters*. - 2016. - Vol. 1. - P. 76-83.
118. Rahul A. V., Sharma A., Santhanam M. Mechanical properties of 3D printable concrete: a review // *Construction and Building Materials*. - 2020. - Vol. 260. - Art. 119858.
119. Engmann J., Servais C., Burbidge A. S. Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. - 2005. - Vol. 132, № 1-3. - P. 1-27.
120. Tattersall G. H., Banfill P. F. G. *The Rheology of Fresh Concrete*. - London: Pitman, 1983. - 356 p.
121. Singaram K. K., Santhanam M. Rheology and pumpability of mix suitable for extrusion-based concrete 3D printing - A review // *Journal of Building Engineering*. - 2024. - Vol. 96. - Art. 110540.
122. Naboni R., Kunic A., Breseghello L. CREATE - 3DLOOP: Integrating feedback-loops for autonomous robot-based 3D Concrete Printing // *Proceedings of the 39th eCAADe Conference, Novi Sad*. - 2021. - Vol. 2. - P. 443-452.
123. Herschel W. H., Bulkley R. Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen // *Kolloid-Zeitschrift*. - 1926. - Vol. 39, № 4. - P. 291-300.
124. Tattersall G. H., Baker P. H. The effect of vibration on the rheological properties of fresh concrete // *Magazine of Concrete Research*. - 1988. - Vol. 40, № 143. - P. 79-89.
125. Liddel P. V., Boger D. V. Yield stress measurements with the vane // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. - 1996. - Vol. 63. - P. 235-261.
126. Coussot P. *Rheometry of Pastes, Suspensions, and Granular Materials: Applications in Industry and Environment*. - Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. - 291 p.
127. 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; опублик. 29.12.2023.

128. Свидетельство на секрет производства (ноу-хау) № 2023006 «Устройство для оценки пластичности цементных смесей» / Славчева Г.С., Юров П.Ю., Левченко А.В.; правообладатель ВГТУ. – Приказ № 01-1-08/796 от 29.12.2023; опубл. 29.12.2023.

129. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026661582 Российская Федерация. Программа для устройства измерения пластичности неорганических паст: заявл. 27.02.2026: опубл. 22.04.2026 / П. Ю. Юров; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет". - EDN ICTXEM.

130. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026610930 Российская Федерация. Программа для устройства измерения пластичности неорганических паст: заявл. 26.12.2025: опубл. 16.01.2026 / П. Ю. Юров; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет". - EDN BDCOGR.

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

132. Патент на полезную модель № 244271 U1 Российская Федерация, МПК G01N 11/00. Устройство для измерения пластичности неорганических паст : заявл. 27.02.2026 : опубл. 23.06.2026 / П. Ю. Юров, Г. С. Славчева, Д. Р. Каракчи-Огли, А. В. Левченко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет". - EDN ZVJGRP.

133. Адамцевич А.О., Пустовгар А.П., Адамцевич Л.А. Аддитивное строительное производство: оценка экономической эффективности

технологии в сравнении с традиционными способами строительства // Строительные материалы. – 2026. – № 1. – С. 45–53.

134. Юров П.Ю., Бритвина Е.А., Славчева Г.С. Разработка требований к параметрам технологического комплекса для строительной 3D-печати // Научная опора Воронежской области. – Воронеж: ВГТУ, 2021. – С. 254–256.

135. Славчева Г.С., Акулова И.И., Юров П.Ю. Комплексная оценка конкурентоспособности строительных 3D-принтеров // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 1. – С. 8–18. – DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-8-18. – EDN DELLBK.

136. Патент № SU 756274 A1 СССР, МПК G01N 11/00. Устройство для определения пластичности строительных растворов / М. Масленников, Л. В. Баранов, С. Н. Григоров, М. Ф. Керкин. - № 2582737; заявл. 28.11.1978; опубл. 15.08.1980. - 4 с.

137. Патент № SU 1661626 A1 СССР, МПК G01N 11/00. Способ определения пластической прочности материалов и устройство для его осуществления / К. Н. Ким, Т. Б. Мишина, Н. Н. Артемова, Т. В. Дегтярева. - № 4675296; заявл. 03.04.1989; опубл. 07.07.1991. - 6 с.

138. Патент № RU 2782675 C1 Российская Федерация, МПК G01N 3/30. Устройство для определения ударной вязкости строительных материалов / А. В. Анцибор. - № 2022101463; заявл. 24.01.2022; опубл. 10.02.2022. - 7 с.

139. Патент № SU 1141309 A1 СССР, МПК G01N 11/00. Устройство для определения реологических характеристик материалов / А. С. Макаров, Б. Н. Валовой, В. В. Способный, В. А. Сушко, Н. Н. Круглицкий. - № 3647759; заявл. 04.10.1983; опубл. 23.02.1985. - 5 с.

140. Юров П. Ю. Обоснование показателя и способа контроля технологичности смеси, как критерия регулирования процесса 3D-печати // Международная конференция по физике материалов, строительным конструкциям и технологиям в строительстве (МРСРЕ-2024): сборник трудов, Владимир, 23-25 апреля 2024 г. - Владимир: АРКАИМ, 2024. - С. 264-272.

Техническое задание ВГУ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям

 А.В. Башкиров

« 14 » 05 2025 г.

Техническое задание

на комплект оборудования «Технологический комплекс строительной 3D-печати»

- Предмет закупки** – технологический комплекс строительной 3D-печати, включающий строительный принтер портального типа и оборудование для перемешивания и подачи смеси к экструдеру.
- Адрес поставки:** г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84.
- Срок поставки товара:** 80 рабочих дней с момента заключения контракта.
- Объем подлежащих к поставке товара, его описание и назначение, технические и функциональные характеристики, комплектация:** все оборудование должно соответствовать указным ниже функциональным и техническим характеристикам:

Наименование	Описание, характеристики
Технологический комплекс строительной 3D-печати	Комплект оборудования предназначен для апробации экспериментальных составов сухих строительных смесей, изготовления малогабаритных бетонных изделий методом аддитивного производства, развития, демонстрации, популяризации и обучения технологии строительной 3D-печати. Принтер объемной печати должен работать по технологии послойного нанесения бетонной смеси с формированием физического объекта по цифровой 3D-модели. Комплекс представляет собой технологическую линию, состоящую из следующих участков: - Центральная – зона размещения принтера портального типа; - Вспомогательные: - Зона размещения шкафа управления технологической линией; - Зона бункера с сырьевой смесью и смесителя; - Зона размещения раствороподающего оборудования; Конструкция принтера: 1. Тип принтера – портальный с возможностью подхода к экструдеру как минимум с двух сторон; Габаритные размеры принтера (ДхШхВ): не более 3000 x 4000 x 3500 мм; Материал исполнения силового каркаса: конструкционный алюминиевый профиль / стальные конструкции, обеспечивающие требуемую жесткость и точность позиционирования экструдерной головки (пункт 2); Использование сервомоторов/сервоприводов по всем осям с обратной связью. 2. Подача сухой смеси в смеситель – ленточный конвейер. Емкость приемного бункера не менее 60 л; Разрывная пластина на решетке бункера;

Угол и материал стенок бункера должен обеспечивать полное его опорожнение без застоев и налипания смеси;
 Крупность заполнителя до 5 мм;
 Предусмотреть возможность автоматической работы в связке со смесителем;
 Предусмотреть защитные противопылевые кожухи в зонах пересыпки сухой смеси;
 Угол наклона и конструкция ленточного конвейера должны обеспечивать подачу сухой смеси к смесителю без просыпей, пыления и обратного соскальзывания материала при подаче.

3. Экструдерная головка.

Материал исполнения экструдерной головки нержавеющая сталь, коррозионностойкая, материал шнека – сталь горяче/холодно катанная;
 Экструдерная головка должна включать зону промежуточного накопления и перемешивания, а также зону шнековой подачи смеси в область печати:
 Зона перемешивания должна вмещать от 3л до 20 л готовой растворной смеси;
 Максимально допустимая фракция заполнителя смеси для экструдерной головки - до 5 мм;
 Предусмотреть автоматическую синхронизированную систему подачи бетонной смеси в зону накопления и перемешивания бетонной смеси;
 Обеспечить возможность ручной дозагрузки смеси в зону накопления экструдера через специальное окно;
 Скорость вращения шнека и мешалки экструдера должна обеспечивать синхронизацию процессов подачи смеси с перемещением головки в области печати без нарушения сплошности и поперечного сечения печатаемого слоя;
 Привод шнека и мешалки должны быть с обратной связью;
 Предусмотреть унификацию и типизацию быстроизнашиваемых элементов экструдерной головки для оперативной замены в случае выхода из строя или выработки ресурса;
 Обеспечить возможность установки сменных сопел разного сечения с диаметром от 20 до 40мм;
 Предусмотреть лазерный датчик уровня смеси в бункере головки;
 Предусмотреть посадочное гнездо для высокочастотного вибратора.

4. Область печати.

Область печати должна составлять: не менее 2000 x 3000 x 1000 мм;
 Регулируемая высота печатного слоя в диапазоне: 5-50мм;
 Ширина печатного слоя: 30-70мм;
 Скорость движения по ширине и длине - 20-300 мм/сек;
 Скорость движения по высоте - не менее 10 мм/сек;
 Предусмотреть возможность печати по загруженной CAD модели, в том числе удаленно;
 Предусмотреть возможность одновременной печати нескольких моделей в области печати;
 Открытая архитектура конструкции (возможность доукомплектации другими устройствами в будущем, например, армированным приспособлением, разглаживающим устройством, поворотным соплом и т.п.).

5. Шкаф управления и индикации должен отвечать следующим требованиям:

Класс защиты: не менее IP54;
 Встроенный HEPA-фильтр;
 Возможность удалённой печати через Wi-Fi/USB без подключения к компьютеру;
 Отслеживание положения моторов по всем осям;
 Кнопка аварийной остановки;

Поддержка формата файлов step, 3mf, stl;
 Формат файлов для печати G-код;
 Поддержка эскизов G-кода;
 Наличие цветного экрана для вывода информации, статуса печати, параметров оборудования;
 Предусмотреть алгоритм безынерционной остановки печати;
 Предусмотреть алгоритм постановки печати на паузу с возобновлением печати от координат точки остановки;
 Предусмотреть датчик и контроллер температуры в экструдере и выходе из смесителя с диапазоном измерения: от +0 до +150 °C;
 Вывод текущего проекта печати на экран с возможностью отображения процесса печати в реальном времени;
 Возможность настройки синхронизации подачи материала из смесителя к принтеру;
 Предусмотреть возможность дополнительного дооснащения принтера оборудованием (драйвера, двигатели, дополнительными разъемами).

6. Программное обеспечение платы управления 3д принтером.

Возможность оперативного регулирования коэффициента экструзии в процессе печати (параметр "flow"), скорости печати.

7. Программное обеспечение для подготовки моделей к печати (Создание G-кода для печати).

Возможность использования открытого/ распространённого программного обеспечения для подготовки моделей на базе печати.

8. Насос:

Синхронизация подачи материала к экструдеру в зависимости от параметров печати в автоматическом режиме;

Тип насоса – перистальтический;

Максимально допустимая крупность заполнителя перекачиваемой смеси – до 5мм;

Давление и расход насоса должны обеспечивать непрерывную подачу материала на длину - до 30 м и высоту - до 8м.

9. Смеситель в сборе.

Смеситель – турбулентный, высокоскоростной;

Объем загрузки: от 20 до 60 л готовой смеси;

Частота вращения смесителя - до 800 об/мин;

Предусмотреть частотное регулирование скорости вращения высокоскоростного смесителя;

Предусмотреть промежуточный бункер-накопитель растворной смеси, с объемом не менее 90 л.

10. Управляющий компьютер.

Операционная система Windows 10 или выше, 64 бит;

Оперативная память (RAM) — 16 ГБ;

Память на твердотельном накопителе — 512 ГБ;

Процессор Intel Core i5-12500H;

Видеокарта — NVIDIA GeForce RTX 3050 или выше;

Возможность подключения к ПК (ноутбуку).

5. Требования к безопасности и качеству товара.

5.1. Поставляемый товар должен быть заводского производства, новым, т.е. не восстановленным и не собранным из восстановленных компонентов, ранее не находившимся в использовании у поставщика или третьих лиц, не подвергавшимся ранее ремонту (модернизации, восстановлению), не иметь производственных дефектов

и неисправностей. В комплект поставки должна входить техническая документация, необходимая для правильной эксплуатации оборудования, подробная спецификация, перечень сопроводительной документации на комплектующие изделия и иная эксплуатационная документация.

5.2. Весь поставляемый товар должен соответствовать действующим нормам и правилам техники безопасности, пожарной безопасности и взрывобезопасности, а также охраны окружающей среды при эксплуатации. В случае возгорания не должно выделяться ядовитых газов и дымов.

5.3. В комплект поставки должны быть включены все непоименованные в спецификации, но необходимые для работы шнуры, соединительные кабели, а также комплект эксплуатационных документов на русском языке (руководство по эксплуатации, гарантийный талон).

5.4. Товар должен быть собран на месте монтажа у Заказчика, протестирован и готов к эксплуатации. Все товары должны быть поставлены в упаковке производителя, не имеющей повреждений.

5.5. На поставляемый товар должна распространяться гарантия не ниже гарантии производителя, но не менее 1 года.

6. Сервис

6.1. Фирма поставщик оборудования должна иметь возможность сервисного обслуживания (сервисных инженеров) на территории РФ.

6.2. В стоимость оборудования должны быть включены:

-поставка оборудования до пункта назначения заказчика;

-шеф-монтаж;

-пусконаладочные работы (в том числе работы по установке и наладке лицензированного ПО);

-консалтинговые услуги по работе с поставляемым оборудованием в течении гарантийного периода;

-проживание, питание на весь период шефмонтажа, ПНР и обучение персонала заказчика.

7. Дополнительное оборудование

7.1 Рохля грузоподъемностью не менее 1,5т;

7.2 Мойка высокого давления;

7.3 Пластиковые поддоны размером 1200х1000 – 4 шт;

7.4 Пластиковые поддоны 1200х800 – 4 шт;

7.5 Весы электронные с 3-го класса точности с пределом взвешивания – 150 кг, точностью измерения не более 20 г, пылезащищенные, площадь платформы не менее 0,25 кв.м.

8. Требования по подключению к электроснабжению

Установленная мощность не более 15КВт, от трехфазной сети 380В.

9. Требования к доставке и отгрузке товара

9.1. Доставка и установка товара (оборудования) должна быть осуществлена силами и средствами Поставщика. Денежные затраты Поставщика на услуги транспортных компаний, иного перевозчика, используемые для выполнения обязательств по Контракту, являются расходами Поставщика и возмещению Заказчиком не подлежат.

9.2. Товар поставляется в неповрежденной и не вскрытой упаковке завода изготовителя, Поставщик организывает доставку таким способом, который не противоречит инструкциям по хранению и перевозке завода изготовителя (световой режим, температурный и т.д.).

9.3. Упаковка, порядок погрузки-разгрузки и транспортировки должны исключать возможность механических повреждений поставляемого товара.

9.4. Поставщик обязан уведомить по электронной почте: ndontsova@cchgeu.ru представителя Заказчика о дате и времени доставки Товара не позднее, чем за 2 (два) рабочих дня до дня поставки.

9.5. Весь товар должен быть доставлен по указанному адресу.

9.6. Осуществить монтаж, настройку, наладку Товара.

9.7. Провести обучение лиц, осуществляющих использование и обслуживание Товара.

10. Обоснование цены: Приложение №1 к Техническому заданию

11. Срок и условия оплаты поставленных товаров:

Окончательные расчеты между Заказчиком и Поставщиком производятся не позднее 7 (семи) рабочих дней с даты подписания Заказчиком структурированного документа о приемке. Поставщик также направляет Заказчику счет, счет-фактуру (в случаях, предусмотренных законодательством Российской Федерации).

Днем оплаты считается день списания денежных средств с расчетного счета Заказчика.

Оплата по Контракту осуществляется по безналичному расчету платежными поручениями путем перечисления Заказчиком денежных средств на расчетный счет Поставщика, указанный в Контракте.

12. Начальная (максимальная) цена контракта: 3 990 000 (три миллиона девятьсот девяноста тысяч) рублей 00 копеек, включая все налоги, сборы и иные обязательные платежи, необходимые для исполнения обязательств по контракту.

13. Источник финансирования: вне бюджетные средства.

(ндр)

14. Статья расходов по кодам бюджетной классификации - 310.

15. КВР 244.

РАЗРАБОТАНО:

Директор школы инженерная школа «Строительства»

 Д.И. Емельянов

12 05 2025 г.

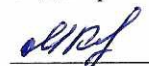
СОГЛАСОВАНО:

Главный бухгалтер

 Л.В. Ненашева

« 13 » 05 2025 г.

Отдел финансового планирования



« 13 » 05 2025 г.



СВИДЕТЕЛЬСТВО

на

Секрет производства (ноу-хау)
№ 2022001

«Технологический комплекс для строительной 3D-печати»

Правообладатель: ФГБОУ ВО «ВГТУ»

**Авторы: Славчева Г.С., Юров П.Ю.,
Каракчи-Огли Д.Р., Резанов А.А.**

Дата регистрации: «07» ноября 2022 г.

Разработка выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования имени профессора Ю.М. Борисова на базе Воронежского государственного технического университета, дооснащение которого проводилось при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-662.

Разработка выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00280, «Разработка принципов создания армированных композитов для строительных 3D-аддитивных технологий на основе моделирования и экспериментального изучения механического поведения и свойств» <https://rscf.ru/project/22-19-00280/>.

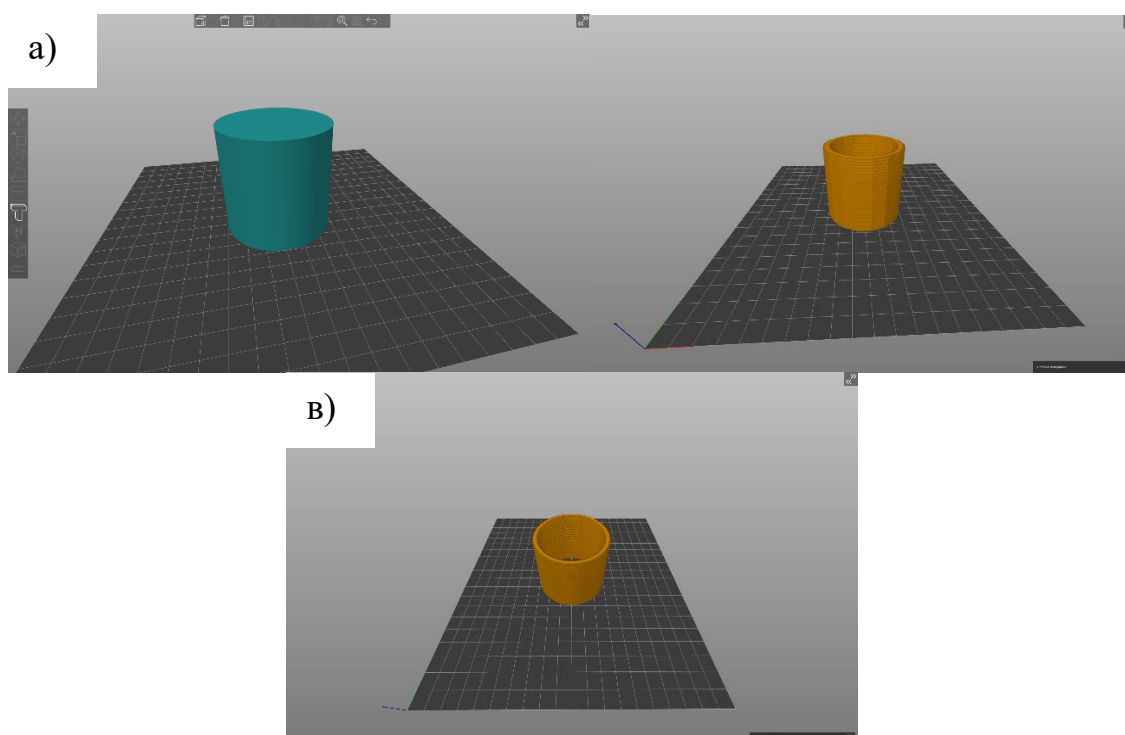
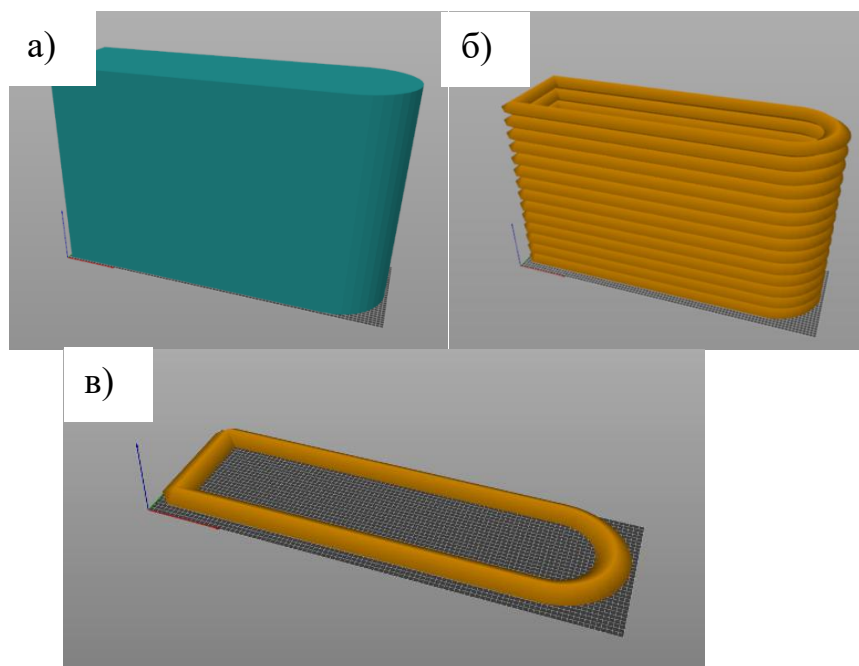
**Первый проректор-
проректор по науке**



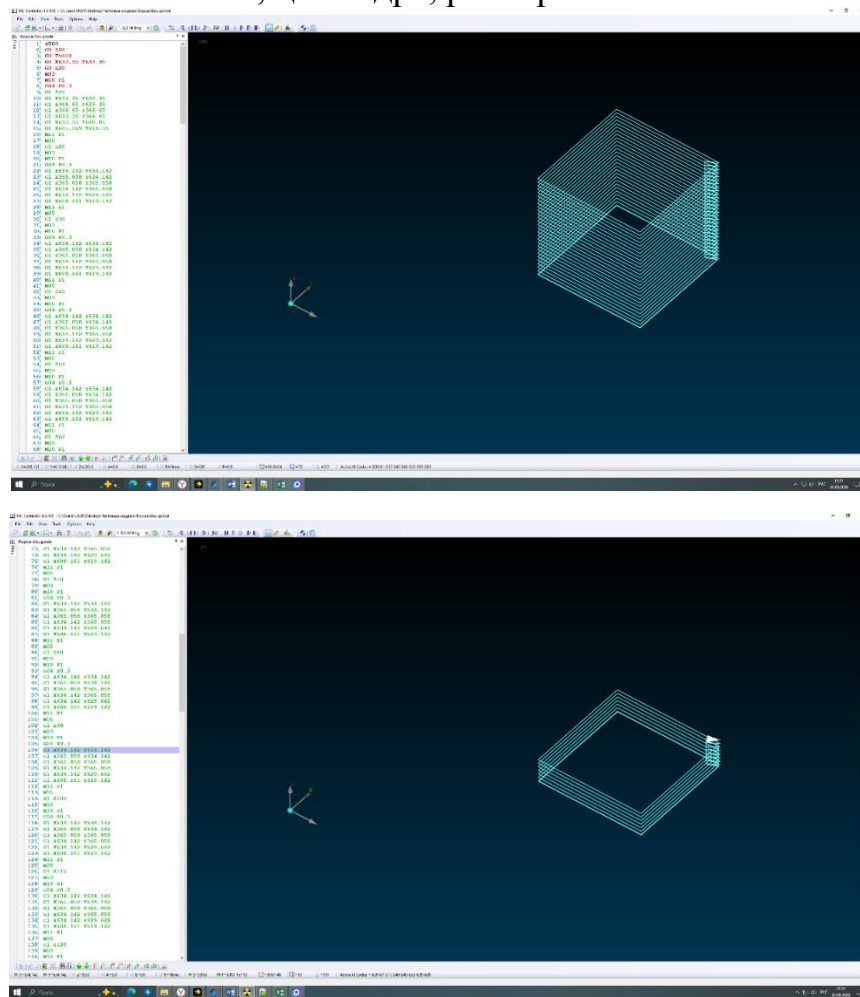
И.Г. Дроздов

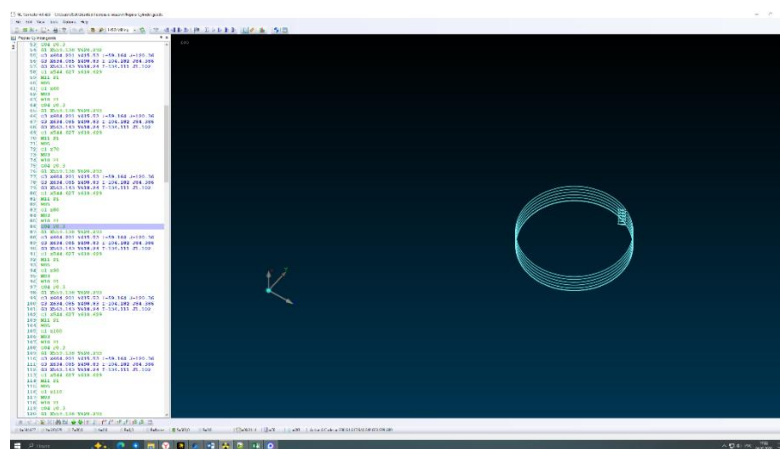
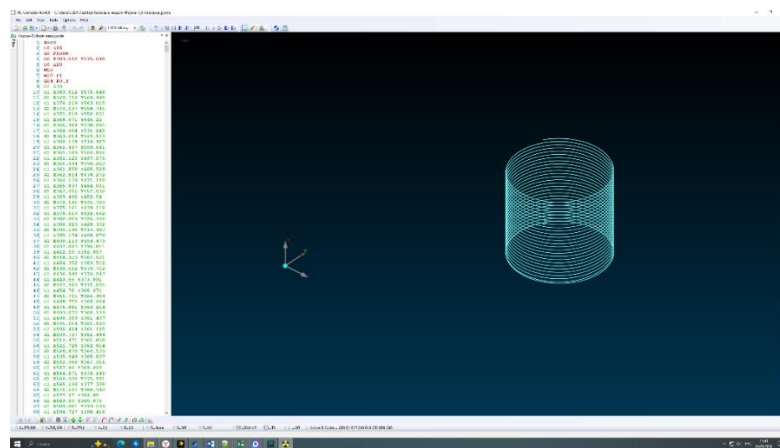
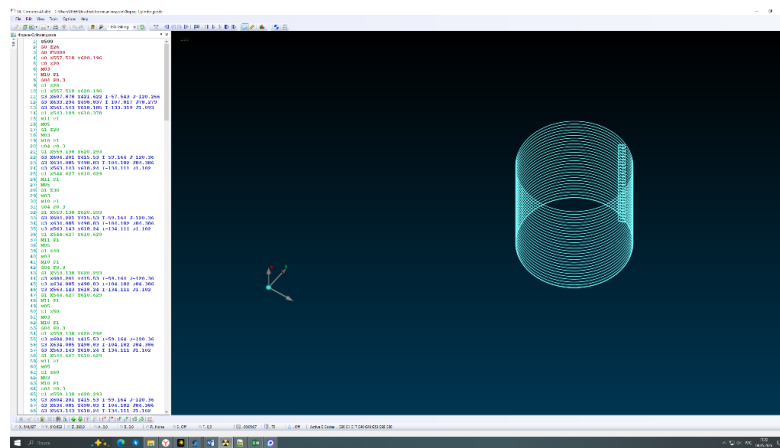
Порядок создания и подготовка к печати CAD-моделей строительных изделий

Шаг 1 - создание схемы печати 3D-печатных образцов. а) CAD-модель, б) CAD-модель по слоям, в) вид одного слоя, цилиндра размерами 300х300х300 мм и 500х500х300 мм. а) CAD-модель, б) CAD-модель по слоям, в) в режиме вазы

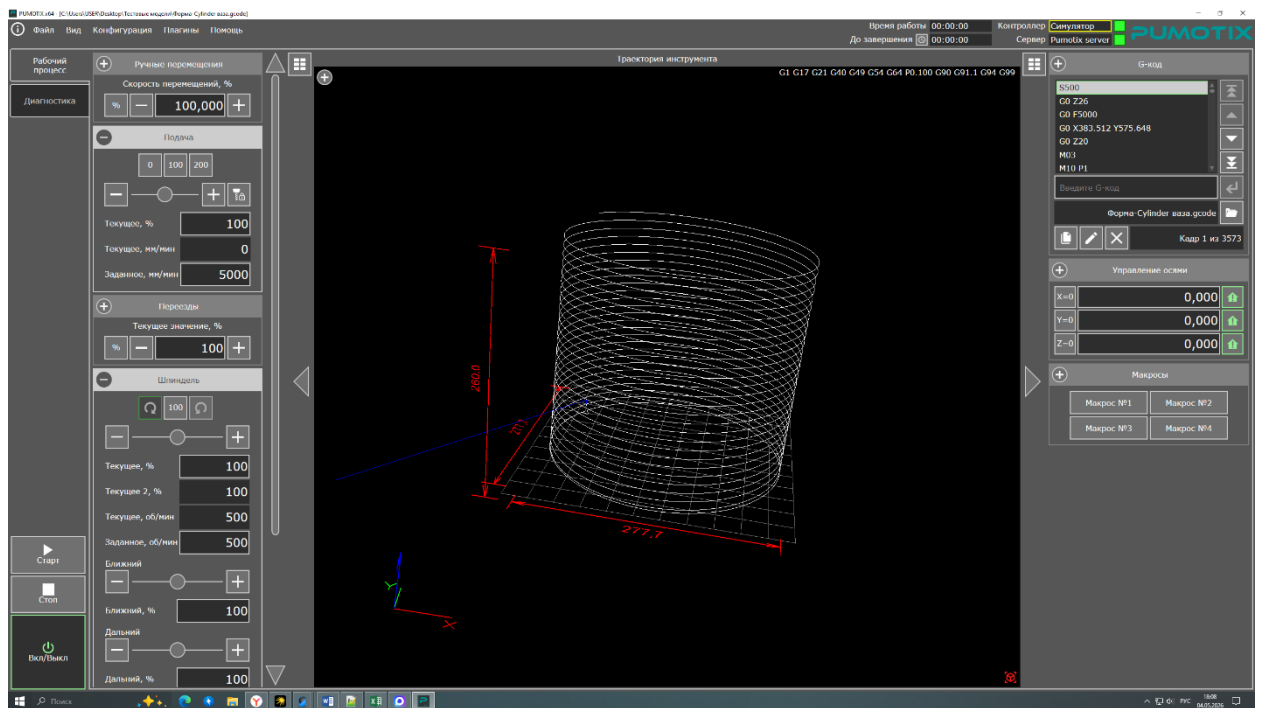
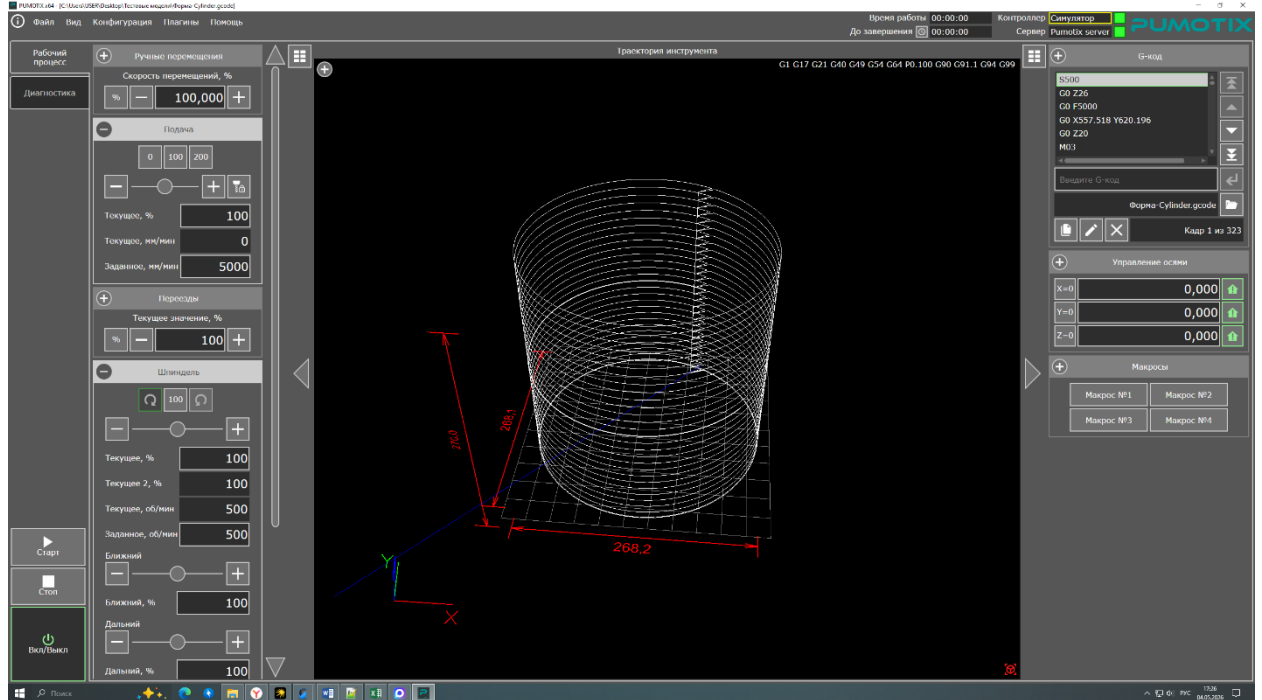


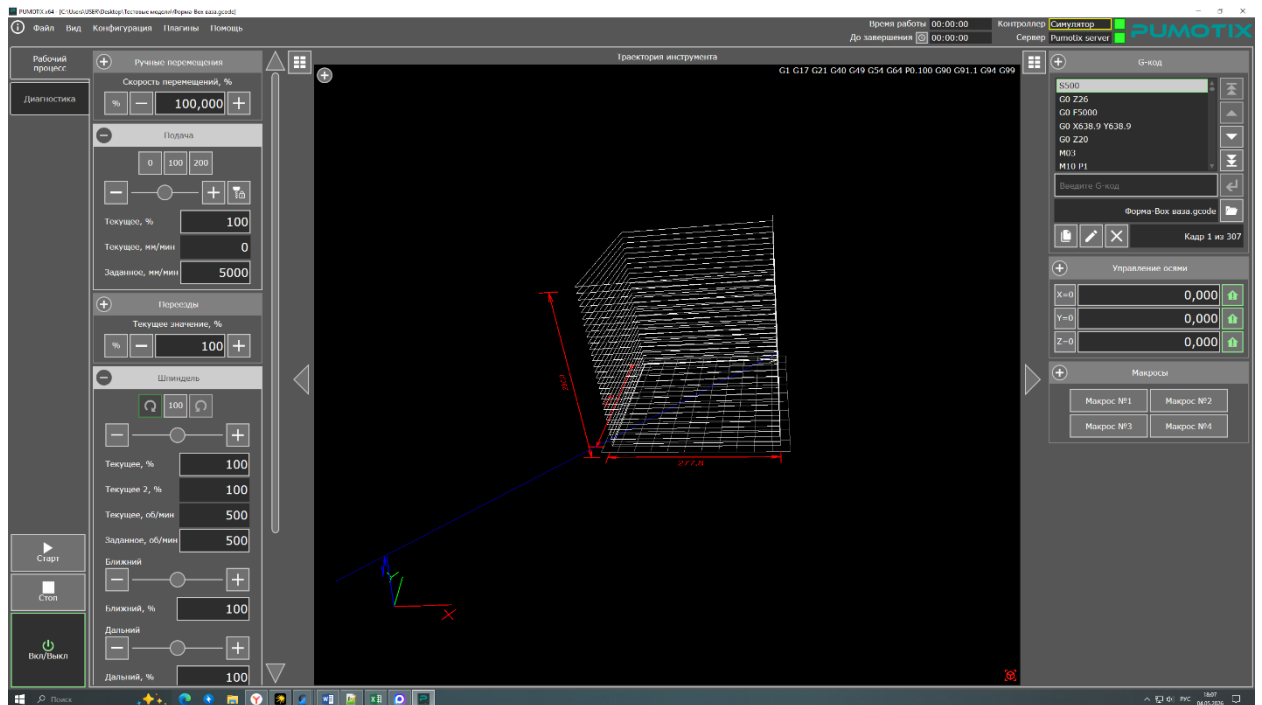
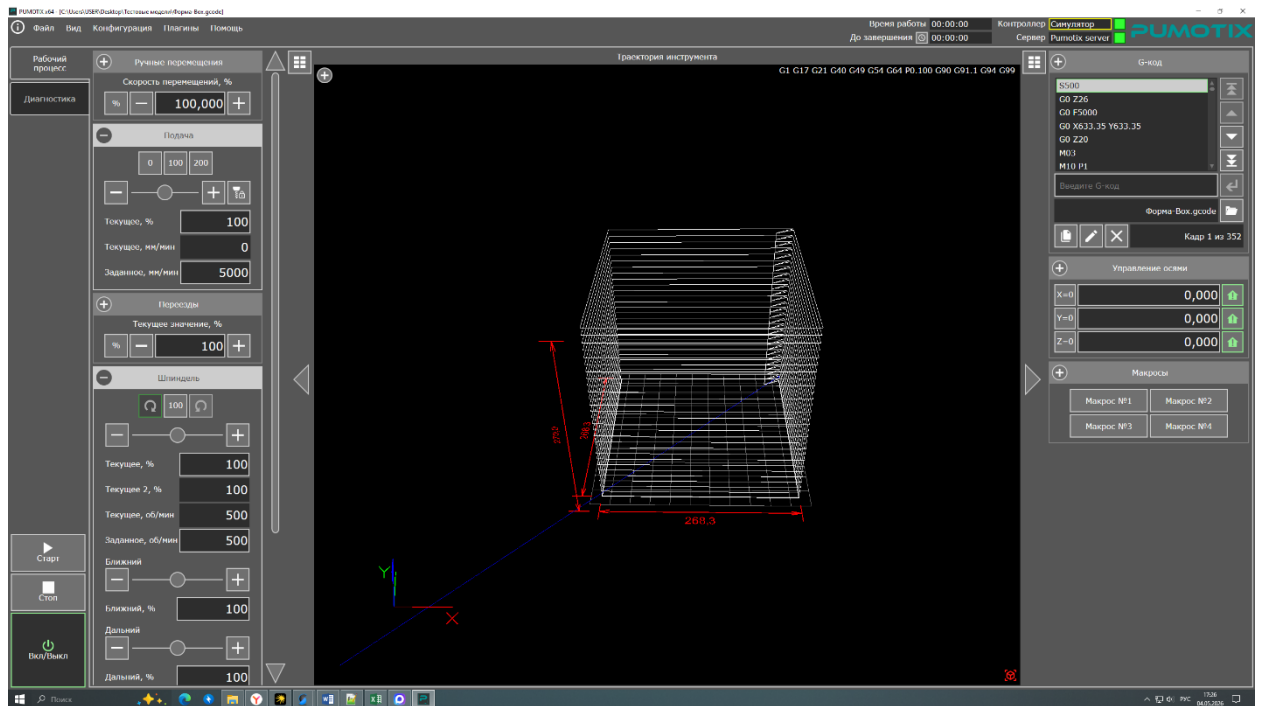
Шаг 2 - визуальная симуляция процесса печати в виде куба, размерами $300 \times 300 \times 300$ мм, цилиндра, размерами $300 \times 300 \times 300$ мм





Шаг 3 - визуальная симуляция процесса печати в виде цилиндра







СВИДЕТЕЛЬСТВО

на

Секрет производства (ноу-хау)

№ 2023006

«Устройство для оценки пластичности цементных смесей»

Правообладатель: ФГБОУ ВО «ВГТУ»

Авторы: Славчева Галина Станиславовна

Юров Павел Юрьевич

Левченко Артем Владимирович

Дата регистрации: «29» декабря 2023 г.

Приказ № 01-1-08/796 от 29.12.2023 г.

Разработка выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования имени профессора Ю.М. Борисова на базе Воронежского государственного технического университета, дооснащение которого проводилось при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-662.

Разработка выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00280 «Разработка принципов создания армированных композитов для строительных 3D-аддитивных технологий на основе моделирования и экспериментального изучения механического поведения и свойств» <https://rscf.ru/project/22-19-00280/>.

Проректор по науке и инновациям



Башкиров А. В.

Воронеж 2023



СВИДЕТЕЛЬСТВО

на

**Секрет производства (ноу-хау)
№ 2023004**

**«Методика и устройство для оценки пластичности
цементных смесей»**

**Правообладатель: ФГБОУ ВО «ВГТУ»
Авторы: Славчева Галина Станиславовна
Юров Павел Юрьевич
Бабенко Дмитрий Сергеевич**

**Дата регистрации: «29» декабря 2023 г.
Приказ № 01-1-08/871 от 29.12.2023 г.**

Разработка выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования имени профессора Ю.М. Борисова на базе Воронежского государственного технического университета, дооснащение которого проводилось при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-662.

Разработка выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00280 «Разработка принципов создания армированных композитов для строительных 3D-аддитивных технологий на основе моделирования и экспериментального изучения механического поведения и свойств» <https://rscf.ru/project/22-19-00280/>.

Проректор по науке и инновациям



Башкиров А. В.

Воронеж 2023

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026610930

Программа для устройства измерения пластичности
неорганических паст

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Воронежский государственный технический
университет" (RU)*

Автор(ы): *Юров Павел Юрьевич (RU)*



Заявка № 2025698076

Дата поступления 26 декабря 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 января 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7add8d531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026661582

**Программа для устройства измерения пластичности
неорганических паст**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Воронежский государственный технический
университет" (RU)*

Автор(ы): *Юров Павел Юрьевич (RU)*



Заявка № 2026614988

Дата поступления 27 февраля 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 22 апреля 2026 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7add8d531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 244065

Устройство для измерения пластичности
неорганических паст

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет" (ВГТУ) (RU)*

Авторы: *Юров Павел Юрьевич (RU), Славчева Галина Станиславовна (RU), Бабенко Дмитрий Сергеевич (RU), Левченко Артем Владимирович (RU)*

Заявка № 2025137251

Приоритет полезной модели 22 декабря 2025 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 15 июня 2026 г.Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 22 декабря 2035 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 244271

Устройство для измерения пластичности
неорганических паст

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет" (ВГТУ) (RU)*

Авторы: *Юров Павел Юрьевич (RU), Славчева Галина Станиславовна (RU), Каракчи-Огли Давут Ресулович (RU), Левченко Артем Владимирович (RU)*

Заявка № 2026105295

Приоритет полезной модели 27 февраля 2026 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 23 июня 2026 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 27 февраля 2036 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «БетоникАРТ»

Беданов А.А.

От «21» 10 2025

АКТ

О внедрении в производство результатов диссертационной работы младшего научного сотрудника Научно-образовательного академического центра строительного материаловедения Юрова Павла Юрьевича «Разработка методов и средств контроля и управления технологическим процессом строительной 3D-печати», выполненной в ФГБОУ ВО Воронежский государственный технический университет (ВГТУ).

Мы, нижеподписавшаяся комиссия в составе:

Генеральный директор Беданов А.А.

Управляющий производством Катралеев А.С.

Составили настоящий Акт о том, что в 2025 году на производственной площадке ООО «БетоникАРТ», расположенной по адресу: Белгородская область, Белгородский р-н, с. Стрелецкое, ул. Зареченская, 856, стр. 7, апробированы методы контроля строительной смеси для 3D печати при производстве малых архитектурных форм, которые затем внедрены в процесс производственного контроля.

Комиссия установила следующее:

Использование разработанных методов и средств контроля позволило оперативно регулировать качество смеси и подстраивать ее под размеры (объем) конечного изделия. В результате эффективность производства в 2025г. повысилась в 1.5 раза за счет увеличения объема выпускаемой продукции в единицу времени в 1.5 раза, снижения потери от брака на 20%. Результатом явилось увеличение валовой прибыли предприятия «БетоникАРТ» на 320 тыс. рублей в год.

Комиссия рекомендует использование указанных методов для контроля качества отпускаемой продукции.

Генеральный директор



Беданов А.А.

Управляющий производством

Катралеев А.С.

Юридический адрес:

ООО «ОЛАН», 308510, Белгородская область, Белгородский район, пгт Разумное, ул.Чехова, дом 1, офис 3а

тел.: +7 903 642-20-20



Адрес производства:

308511, Белгородская область, Белгородский район, с. Стрелецкое, ул.Зареченская, 856

e-mail: olanzabor@yandex.ru
www.betonicART.ru



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО "КЕЙКОД"

Беданов А.А.

От «26» 09 2025

АКТ

О внедрении в производство результатов диссертационного исследования младшего научного сотрудника Научно-образовательного академического центра строительного материаловедения Юрова Павла Юрьевича **«Разработка методов и средств контроля и управления технологическим процессом строительной 3D-печати»**, выполненной в (ФГБОУ ВО Воронежского государственного технического университета (ВГТУ))

Мы, нижеподписавшаяся комиссия в составе:

Генеральный директор Беданов А.А.

Главный технолог Данилов М.Ю.

Составили настоящий Акт о том, что в течение 2024 года в производственном цехе ООО "КЕЙКОД", расположенного по адресу: Белгородская область, Белгородский р-н, п. Дубовое, ул. Заводская, д. 4д, реализованы методы цифрового моделирования процесса 3D печати строительными смесями при производстве малых архитектурных форм.

Комиссия установила следующее:

Внедрение методики цифрового моделирования процесса 3D печати (создание цифрового двойника 3D принтера) позволило компании ООО "КЕЙКОД" повысить эффективность и производительность выпускаемых строительных принтеров.

Комиссия рекомендует использование методики цифрового моделирования для анализа «поведения» цементной смеси при 3D печати с целью адаптации режимов работы и отладки оборудования.

Генеральный директор

Беданов А.А.

Главный технолог

Данилов М.Ю.



Акт экспертизы 3D-моделей

Акт экспертизы № 01

CAD-моделей для строительной 3D-печати

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- **Дата проведения экспертизы:** 05.02.2026
- **Организация проведения экспертизы:** Автономная некоммерческая организация «Молодые изобретатели рационализаторы» АНО «МИР».
- **Основание для проведения экспертизы:** Запрос ВГТУ согласования и проведения экспертизы CAD-моделей для строительной 3D-печати.
- **Количество:** 20 уникальных единиц (см. Приложение №1).
- **Цель экспертизы:** Оценка технологичности, геометрической точности и соответствия параметрам печати 3D-принтере «Крафер-У» (производитель ООО «KEYCODE», Россия) на CAD-моделей малых архитектурных форм, предназначенных для изготовления методом 3D-печати цементными смесями.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОВЕРКИ

Экспертиза проведена с учетом физико-механических свойств бетонной смеси:

- **Базовая смесь:** Бетон В40 / Цвет: Серый
- **Целевая фактура:** Фактурная
- **Установленная толщина слоя:** 7 мм
- **Ширина линии (экструзии):** 50 мм
- **Максимальная высота изделия** 600 мм

3. МЕТОД ЭКСПЕРТИЗЫ

Экспертиза проводится методом **виртуального моделирования процесса 3D-печати (симуляции)** на 3D-принтере «Крафер-У» (производитель ООО «KEYCODE», Россия) с последующим контролем геометрии.

4. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

№ п/п	Наименование оборудования/ПО/материалов	Модель / Версия	Заводской номер / Идентификатор
1.	Программное обеспечение для слайсинга (G-code генератор):	SuperSlicer	Версия V2.7.62.0
2.	Программное обеспечение для симуляции печати (при наличии):	NC Corrector	Версия V4.0
3.	Строительный 3D-принтер (для физических испытаний):	3D-принтер «Крафер-У» (производитель ООО «KEYCODE», Россия)	№0101046833

5. ПОДГОТОВКА К ИСПЫТАНИЯМ

CAD-модель проверена на целостность, отсутствие ошибок: замкнутые объемы, отсутствие инвертированных нормалей. Модель импортирована в ПО для слайсинга. Установлены параметры, соответствующие реальному технологическому процессу:

- **Базовая смесь: Бетон М400 / Цвет: Серый**
- **Целевая фактура: Фактурная**
- **Установленная толщина слоя: 7 мм**
- **Ширина линии (экструзии): 50 мм**
- **Максимальная высота изделия в заказе: 600 мм**
- **Скорость печати: 5000 мм/мин**
- **Заполнение (infill): 0 %**
- **Параметры поддержек (supports): Отсутствие**

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

№ п/п	Контролируемый параметр	Критерий соответствия (норма)	Фактическое значение (из ПО)	Примечание / Оценка
1.	Время виртуальной печати	<i>Ориентировочное, не более 1 ч на изделие</i>	<i>65 мин</i>	<i>Соответствует</i>
2.	Обнаружение "висящих" элементов (overhangs)	Угол $> 10^\circ$ (без поддержек)	Критические углы не обнаружены. Макс. угол: 10°	Конструкции не требуют поддержек.
3.	Соотношение высоты к толщине стенки (устойчивость при печати)	Рекомендуемое Н/Т 1:1 для тонких стен	Макс. соотношение: 2:1	Конструкция устойчива, риск колебаний при печати минимален.
4.	Целостность контура (периметра) на каждом слое	Все слои должны иметь замкнутый/непрерывный контур	<i>Слои имеют замкнутый контур</i>	Разрывы не обнаружены
5.	Целостность G-кода после генерации	Отсутствие ошибок в ПО слайсере и симуляторе	Ошибки не обнаружены	Код пригоден для передачи на принтер.
6.	Объем материала на изделие	<i>60-70 кг</i>	<i>60-70 кг</i>	<i>Для оценки материалоемкости</i>
7.	Угол наклона	Не более 76° к горизонту	80°	Годен
8.	Радиус углов	$R \geq 1/2$ ширины слоя (≥ 15 мм)	10 мм	Годен
9.	Габариты	До 4000 x 2300 x 1000 мм	400x500x600 мм	Годен

Визуализация представлена в приложении №2

Вывод: Годен к печати. Образец соответствует возможностям принтера

7. АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ

- **Общий расчетный объем смеси:** 2 м³
- **Требуется армирование:** Нет

8. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРТИЗЫ И ВЫВОДЫ

На основании проведенного моделирования, представленные 20 CAD-моделей соответствуют параметрам печати 3D-принтере «Крафер-У» (производитель ООО «KEYCODE», Россия). Технологические риски (обрушение слоев, отклонение от размеров) оценены как минимальные при соблюдении температурного режима смеси.

«05» февраля 2026 г.

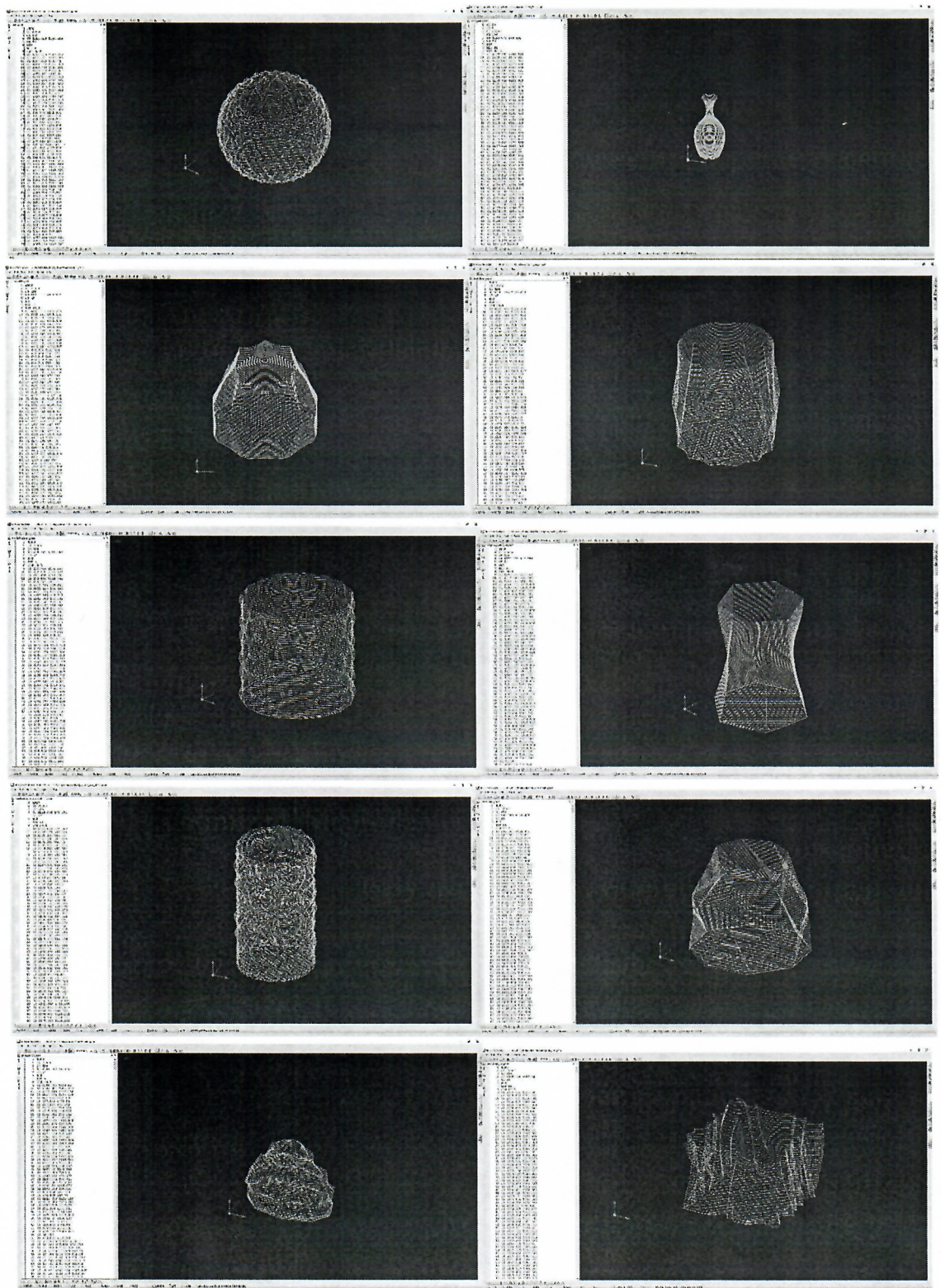
Директор АНО «МИР»

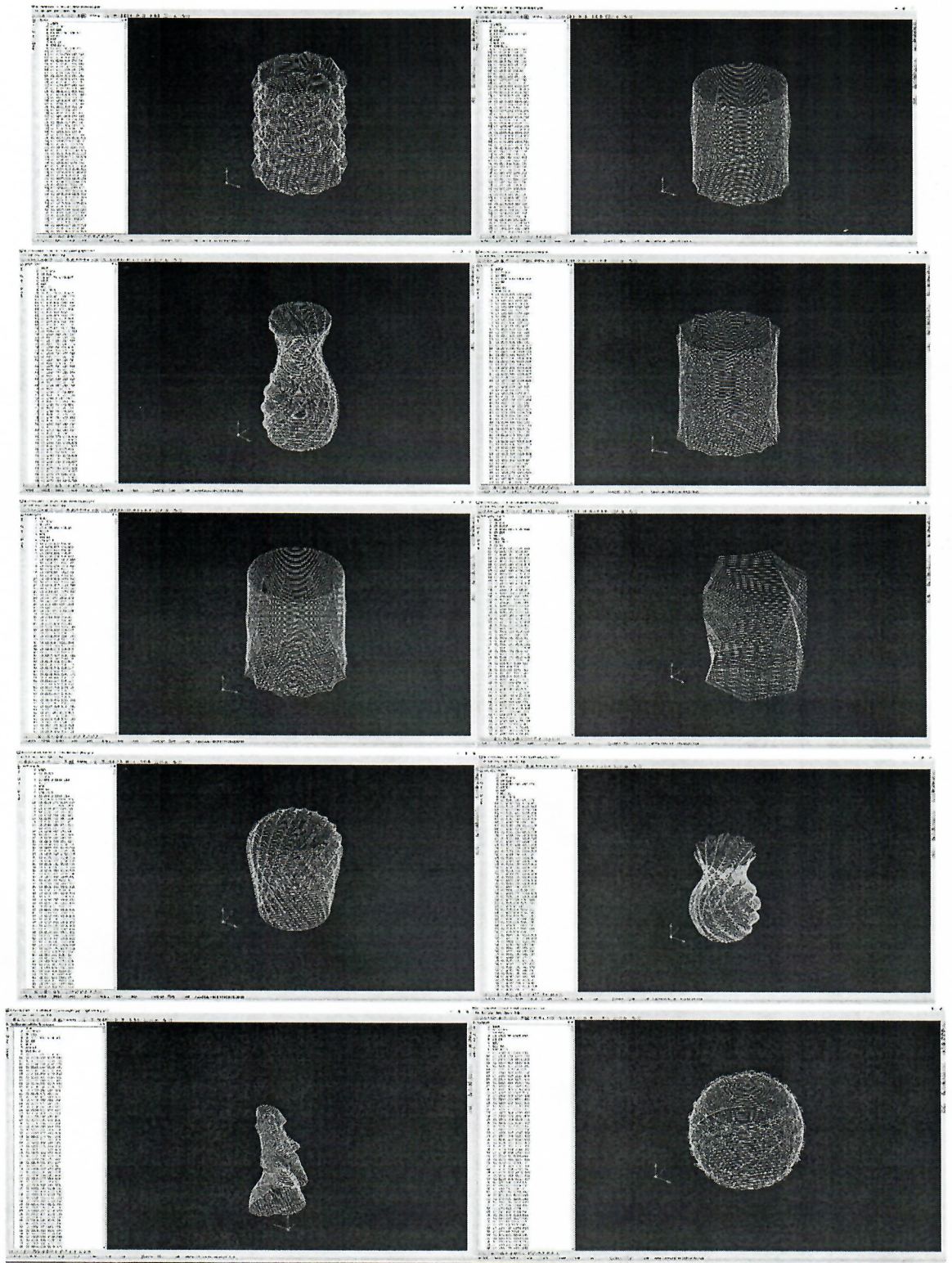


Михайлов А.Н.

Перечень проверенных файлов

1. Heartbeat_Spiralize_Vase
2. Hexagonal_twisted_pot
3. HexSurfaceVase1
4. Large_drops
5. PokeVaseA01
6. PokeVaseA02
7. PokeVaseA03
8. Queer_Qube_Box
9. Sotv12
10. Spikes
11. Spiral_Vase
12. Symetric
13. Thin_drops
14. Twisted_Vase_Basic
15. Vase_flower
16. Vase_Large_Tiwst
17. Vase_Mode_optimized_Moai-Planter_2
18. Vase1
19. Vase3
20. ZYYX_Vase





**Инструкция подготовки САD-моделей изделий для строительной
3D-печати**

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

УТВЕРЖДАЮ

Директор Инженерной школы
«Строительство» ВГТУ



/ Емельянов Д.И. /

2026 г.

СОГЛАСОВАНО

Генеральный директор
ООО «БетоникАРТ»



/ Беданов А.Д. /

2026 г.

ИНСТРУКЦИЯ

**ПОДГОТОВКИ САД МОДЕЛЕЙ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ
СТРОИТЕЛЬНОЙ 3D-ПЕЧАТИ**

Разработчик: младший науч-
ный сотрудник научно-обра-
зовательного академического
центра строительного матери-
аловедения (инженерной
школы «Строительство»)
Юров П.Ю.

Воронеж – 2026

1. Область применения

Настоящая методика устанавливает порядок создания, проверки и подготовки цифровых моделей строительных изделий к аддитивному производству на строительном 3D-принтере. Методика распространяется на все этапы: от разработки твердотельной геометрии в CAD-системе до передачи финального управляющего кода (G-кода) на принтер.

2. Нормативные ссылки

ГОСТ 2.052–2015 «Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия».

Техническая документация на используемый строительный 3D-принтер.

Руководство пользователя слайсера SuperSlicer (или иного, применяемого на производстве).

Инструкция по работе с программой визуальной верификации NC Corrector V4.0.

3. Общие положения

3.1. Цифровая модель изделия является исходным документом для всего производственного цикла 3D-печати. От её качества и технологичности зависят стабильность процесса печати и конечные характеристики изделия.

3.2. Разработка CAD-модели выполняется специалистом по 3D-моделированию на основании технического задания и (или) архитектурного эскиза.

3.3. Подготовка модели включает четыре последовательных этапа:

- 1) Создание и первичная верификация твердотельной геометрии;
- 2) Послойное разбиение (слайсинг) с назначением технологических параметров;
- 3) Постобработка и адаптация управляющего кода (G-кода);
- 4) Оценка технологичности модели под конкретный 3D-принтер.

4. Создание и первичная верификация CAD-модели

4.1. Модель разрабатывается в программном комплексе SolidWorks (рекомендуемая версия – 2025 или новее) и экспортируется в формат 3MF (или STL, STEP по согласованию с технологом).

4.2. Геометрия модели должна удовлетворять следующим требованиям:

- 1) Быть «водонепроницаемой» (замкнутой), не содержать вырожденных граней, пересекающихся или накладывающихся поверхностей;
- 2) Не содержать элементов, толщина которых меньше минимального размера экструдированного слоя (как правило, не менее 20 мм для бетонных смесей с крупным заполнителем);
- 3) Не иметь нависающих элементов с углом более 15° к вертикали без поддерживающих конструкций (для бетонной печати поддержки не применяются);

4) Минимальный радиус скругления внутренних и внешних углов должен быть не менее 20 мм (ограничение связано с крупностью заполнителя и траекторией сопла);

5) Габаритные размеры модели должны находиться в пределах рабочего поля принтера с запасом не менее 50 мм по каждой оси.

4.3. После построения геометрии выполняется автоматизированная проверка целостности (встроенными средствами SolidWorks или сторонними утилитами). Специалист визуально оценивает модель на предмет явных дефектов.

4.4. Результаты верификации фиксируются в Протоколе верификации CAD-модели. В протоколе указываются: идентификатор модели, дата проверки, перечень проверяемых критериев, заключение («пригодна» или «требуется доработки»), подпись специалиста. При выявлении недостатков модель возвращается на доработку с указанием конкретных замечаний.

5. Слайсинг и генерация G-кода

5.1. Подготовленная и верифицированная CAD-модель передаётся технолог-программисту ЧПУ для послойного разбиения.

5.2. Слайсинг выполняется в программном комплексе SuperSlicer (рекомендуемая версия 2.7.62.0-beta2 или более поздняя), адаптированном для строительной 3D-печати.

5.3. При настройке слайсинга назначаются следующие параметры:

1) Высота печатного слоя – выбирается из ряда 10–25 мм в зависимости от требуемой детализации и пластичности смеси;

2) Диаметр сопла – из ряда 20, 25, 27, 30 мм (назначается согласно Карте параметров);

3) Ширина одиночного прохода – принимается равной диаметру сопла;

4) режим укладки – классический послойный (с разрывом контура на каждом слое) либо режим «вазы» (непрерывная спираль, для тонкостенных изделий);

5) Скорость линейного перемещения экструдера (мм/с) и частота вращения шнека (об/мин) – назначаются в соответствии с Картой технологических параметров, полученной на этапе численного моделирования;

6) Заполнение – для строительных конструкций, как правило, 100 % (одинарная стенка), внутренние полости не заполняются.

5.4. Назначенные параметры заносятся в Карту параметров слайсинга, которая является исходным документом для генерации G-кода и последующего контроля.

5.5. Слайсер генерирует предварительный G-код. Специалист проверяет визуализацию слоёв в слайсере на предмет артефактов (пропуски, самопересечения).

6. Постобработка и верификация G-кода

6.1. Сгенерированный G-код содержит команды, ориентированные на FDM-печать пластиком (управление температурой, обдув, сброс координат), которые не поддерживаются системой управления строительным принтером «PUMOTIX».

6.2. Выполняется адаптация G-кода:

- 1) Удаление команд, связанных с температурой и обдувом (M104, M109, M140, M190, M106, M107 и аналогичные);
- 2) Удаление комментариев и избыточных данных (используется текстовый редактор с функцией замены по регулярному выражению «;.*»);
- 3) Удаление пустых строк;
- 4) Добавление стартовых и завершающих команд, требуемых «PUMOTIX» (G90, G21, G28, M84 и т.п. согласно технической документации на принтер).

6.3. Адаптированный G-код загружается в программу визуальной верификации NC Corrector V4.0. Выполняется симуляция траектории движения инструмента:

- 1) Проверяется отсутствие разрывов контура и самопересечений;
- 2) Контролируется нахождение всей траектории в пределах рабочего поля (для стандартной конфигурации – 1000×1000 мм);
- 3) Визуально оценивается послойное наращивание.

6.4. При выявлении ошибок G-код возвращается на этап слайсинга для корректировки параметров или ручного редактирования.

6.5. По завершении проверки оформляется Протокол проверки и адаптации G-кода. В нём фиксируются: идентификатор файла G-кода, дата, перечень удалённых команд, результаты верификации, заключение («пригоден» / «требуется доработки»), подпись технолога-программиста ЧПУ.

7. Оценка технологичности модели

7.1. Подготовленная модель (CAD + G-код) перед запуском в печать проходит оценку на соответствие технологическим возможностям конкретного 3D-принтера.

7.2. Оценка выполняется инженером-технологом (или специалистом, ответственным за эксплуатацию принтера) и включает:

- 1) Сопоставление габаритов модели с рабочим полем принтера;
- 2) Проверку возможности экструзии выбранной смесью (по показателю пластичности $P_{пл}$) с назначенными параметрами;

3) Анализ рисков деформации на основе предшествующего численного моделирования (если оно проводилось).

7.3. По итогам оценки оформляется Акт проверки модели на технологичность, содержащий заключение о пригодности модели к печати либо рекомендации по доработке (корректировка геометрии, изменение параметров слайсинга, замена состава смеси).

8. Документирование

8.1. Все этапы подготовки модели документируются. Перечень обязательных документов:

- 1) Протокол верификации CAD-модели;
- 2) Карта параметров слайсинга;
- 3) Протокол проверки и адаптации G-кода;
- 4) Акт проверки модели на технологичность.

8.2. Сквозной учёт подготовленных моделей и соответствующих им управляющих программ ведётся в Журнале регистрации подготовленных моделей и программ. В журнале указываются: порядковый номер, наименование изделия, идентификатор CAD-модели, даты выполнения этапов, версии используемого ПО, ФИО ответственных лиц.

**Методика измерения пластической прочности
смесей, готовых к употреблению в технологии
строительной 3D-печати**

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

УТВЕРЖДАЮ

Директор Инженерной школы
«Строительство» ВГТУ



/ Емельянов Д.И. /

2026 г.

СОГЛАСОВАНО

Генеральный директор
ООО «БетоникАРТ»



/ Беданов А.Д. /

2026 г.

МЕТОДИКА

**ИЗМЕРЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СМЕСЕЙ,
ГОТОВЫХ К УПОТРЕБЛЕНИЮ В ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬНОЙ
3D-ПЕЧАТИ**

Разработчик: младший
научный сотрудник научно-
образовательного
академического центра
строительного
материаловедения
(инженерной школы
«Строительство») Юров П.Ю.

Воронеж – 2026

1. Общие положения

1.1. Настоящая методика устанавливает порядок измерения пластической прочности $R_{пл}$ цементных смесей, готовых к употреблению, с помощью разработанного портативного пластометра.

1.3. Прибор фиксирует текущее усилие при погружении индентора и после завершения измерения выводит на дисплей максимальное значение пластической прочности $R_{пл}$ в кПа. Полученное значение используется как входной параметр для выбора режима печати по Карте технологических параметров.

1.4. Рабочий диапазон пластической прочности для смеси составляет 0,8–2,8 кПа. При выходе измеренного значения за указанные границы смесь признаётся непригодной и подлежит корректировке.

2. Средства измерений и вспомогательное оборудование

Прибор поставляется в двух исполнениях:

2.1. Пластометр ручной (компактный) с набором сменных насадок.

2.2. Пластометр автоматизированный с шаговым двигателем (скорость внедрения 2 мм/с) и набором сменных насадок.

2.3. Насадки сменные:

конические: с углом при вершине 30°, 45°, 60° и высотой 20 мм, 30 мм; цилиндрические (плунжеры) от грунтового пенетрометра.

При отсутствии специальных указаний используется конус 45° с глубиной погружения 20 мм.

2.4. Форма-кольцо цилиндрическая диаметром 100 мм, высотой 50 мм.

2.5. Шпатель, пробоотборник, линейка металлическая.

3. Порядок подготовки к измерениям

3.1. Проверить чистоту индентора и опорной плиты прибора.

3.2. Установить требуемую насадку на шток.

3.3. Для автоматизированного пластометра: включить прибор, дождаться самотестирования и автоматической калибровки нулевого положения.

4. Порядок выполнения измерений

4.1. Оперативный контроль

4.1.1. При отборе пробы ее масса должна быть не менее 150 г. Место отбора: бункер, свежееуложенный слой или зона выхода экструдера.

4.1.2. Проба помещается в форму-кольцо Ø100×50 мм, установленную на жёстком основании. Заполнение происходит без пустот. Излишки снимают заподлицо, поверхность заглаживают без уплотнения. Время от отбора до начала измерения – не более 180 с.

4.1.3. При оценке пластической прочности по месту приготовления смеси выбирается ровный участок бункера или слоя, прижать опорную плиту прибора к поверхности.

4.1.4. Выбирается тип насадки на приборе (кнопками). Устанавливается прибор вертикально. Плавно, без рывков погрузить шток до упора. Зафиксировать максимальное значение $P_{пл}$ на дисплее.

5. Лабораторный метод контроля

5.1. Отобрать пробу и заполнить форму-кольцо по п. 4.1.1.

5.2. Установить форму на предметный столик прибора соосно с конусом.

5.3. Кнопками выбрать тип насадки и запустить цикл измерения. Прибор автоматически погрузит шток с постоянной скоростью 2 мм/с, зафиксирует максимальное усилие и выведет значение $P_{пл}$ на дисплей.

6. Обработка результатов

6.1. На каждом контрольном интервале выполняется не менее 6 параллельных определений на отдельных пробах.

6.2. Вычислить среднее арифметическое значение. Значения, отличающиеся от среднего более чем на 15 %, отбраковать, после чего вычислить новое среднее.

6.3. Полученное среднее значение $P_{пл}$ является окончательным результатом измерения.

7. Документирование

7.1. Результаты измерений заносятся в «Протокол измерения пластической прочности». В протоколе указываются: дата, время, точка отбора, идентификатор партии, тип прибора и насадки, измеренные значения, среднее, подпись оператора.

8. Применение результатов

8.1. Полученное значение $P_{пл}$ используется для выбора технологического режима печати в соответствии с Картой параметров. Если значение находится в пределах 0,8–2,8 кПа, выбирается соответствующий поддиапазон и уставки. Если значение выходит за границы, смесь корректируется или бракуется.

Инструкция по изготовлению строительных изделий методом 3D-печати

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

УТВЕРЖДАЮ

Директор Инженерной школы
«Строительство» ВГТУ



/ Емельянов Д.И. /

«21» 04 2026 г.

СОГЛАСОВАНО

Генеральный директор
ООО «КЕЙКОД»

/ Беланов А.Д. /

«21» 04 2026 г.



ИНСТРУКЦИЯ

**ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ
3D-ПЕЧАТИ**

Разработчик: младший науч-
ный сотрудник научно-обра-
зовательного академического
центра строительного матери-
аловедения (инженерной
школы «Строительство»)
Юров П.Ю.

Воронеж – 2026

1. Общие положения

Настоящая инструкция определяет порядок действий оператора 3D-принтера при подготовке, запуске и ведении процесса печати с непрерывным контролем пластической прочности смеси $R_{пл}$ и адаптивным выбором технологических режимов.

Инструкция распространяется на все этапы: от приготовления смеси до сдачи готового изделия.

2. Технологические документы и инструкции

Методика измерения пластической прочности смесей, готовых к употреблению.

Руководство по эксплуатации системы управления «PUMOTIX».

3. Порядок выполнения операций

3.1. Приготовление смеси и операционный контроль

3.1.1. Приготовление смеси производится по утвержденной рецептуре непосредственно перед началом печати.

3.1.2. Сразу после приготовления оператор выполняет измерение пластической прочности $R_{пл}$ в соответствии с методикой. Измерение проводится ручным или автоматическим пластометром. Результат фиксируется в лабораторном журнале. Если показатель попадает в допустимый рабочий диапазон для данного принтера наступает этап выбора режима печати.

3.1.3. Если $R_{пл}$ выходит за границы рабочего диапазона, выполняется корректировка состава (варьирование водоцементного отношения, добавление пластификатора). После корректировки проводится повторный контроль. Если и после повторной корректировки значение не входит в рабочий диапазон, партия смеси бракуется, производится новый замес.

3.1.4. В соответствии с фактическим значением свежеприготовленной смеси выбирается режим печати из диапазона режимов, которые были установлены для изделия заданной геометрии в диапазоне вариативности пластической прочности смеси. В соответствии с выбранным режимом определяются начальные уставки принтера: скорость движения сопла V , высоту слоя H , частоту вращения шнека S .

4 Настройка принтера и запуск печати

4.1. Оператор загружает управляющую программу (G-код) в систему управления «PUMOTIX». Через интерфейс программы устанавливаются начальные параметры, выбранные по п. 3.1.3: скорость движения сопла (F), скорость вращения шнека (S), высота слоя.

4.2. Выполняется калибровка начала координат по осям X , Y , Z относительно рабочего стола (поддона).

4.3. После подтверждения всех уставок оператор запускает процесс печати.

5. Мониторинг пластичности в процессе печати

5.1. В ходе печати, параллельно с укладкой слоев, осуществляется непрерывный контроль пластической прочности смеси:

при работе с большим замесом – каждые 10 минут до завершения печати;

после каждой загрузки новой порции смеси в бункер;

при визуальном обнаружении признаков изменения консистенции (разрывы, оплывание).

5.2. Измерение $R_{пл}$ производится ручным пластометром непосредственно в бункере или на свежееуложенном слое, либо автоматическим пластометром с отбором пробы.

5.3. Если текущее значение $R_{пл}$ изменяется, оператор через интерфейс «PUMOTIX» изменяет параметры печати (скорость сопла, обороты шнека) на соответствующие новому поддиапазону, не прерывая процесс печати.

5.4. При выходе $R_{пл}$ за границы допустимого диапазона (менее 0,8 кПа или более 2,8 кПа) печать приостанавливается. Выполняется корректировка или замена смеси в соответствии с п. 3.1.4.

6. Завершение печати и приемка изделия

6.1. По окончании печати оператор выполняет визуальный осмотр изделия и инструментальные измерения геометрии (высота, ширина стенок, отклонения формы).

6.2. Результаты измерений и параметры процесса заносятся в Акт приёмки готового изделия и Журнал производства работ.

6.3. При обнаружении систематических дефектов производится уточнение табличных режимов и, при необходимости, повторное численное моделирование.

7. Документирование

Все результаты измерений $R_{пл}$, выбранные режимы, факты корректировок и замены смеси регистрируются в лабораторном журнале учета.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО ВГТУ/Яременко С. А./
«04» _____ 2026 г.**АКТ ВНЕДРЕНИЯ****результатов научных исследований в учебный процесс**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационных исследований аспиранта Юрова П.Ю. *«Совершенствование процесса строительной 3D-печати на основе моделирования и контроля технологических режимов»* внедрены в учебный процесс университета.

Заказчик: кафедра технологии строительных материалов, изделий и конструкций ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

1. Вид внедряемых результатов.

Разделы лекционных курсов и практических занятий по дисциплине «Технологические инновации в строительстве», обучающихся по направлению 08.04.01 «Строительство», программы «Экспертиза качества и маркетинг строительных материалов».

2. Форма внедрения.

1. В лекционном курсе и блоке практических занятиях дисциплины «Технологические инновации в строительстве» разработаны разделы, посвященные особенностям технологии строительной 3D-печати и средствам контроля процесса.

3. Эффективность практической реализации.

Внедрение результатов диссертационного исследования Юрова П.Ю. в учебный процесс позволяет обучающимся ознакомиться с информацией, посвященной моделированию процессов экструзии, послойной укладки, а также обоснованию характеристик экструдированности и формоустойчивости цементных композиционных материалов в процессе строительной 3D-печати; производить оценку качества технологических и реологических цементных композиционных материалов в условиях строительной 3D-печати.

Повышен содержательный уровень лекционных курсов и практических занятий при подготовке магистров, обучающихся по направлению 08.04.01 «Строительство», программы «Экспертиза качества и маркетинг строительных материалов».

Заведующий кафедрой ТСМИиК

Разработчик рабочих программ
и оценочных материалов по дисциплине
«Технологические инновации в строительстве»,
д.т.н., проф. каф. ТСМИиК

Усачев А.М.

Славчева Г.С.