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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2026

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

Научный руководитель:	**Славчева Галина Станиславовна** доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Мухаметрахимов Рустем Ханифович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра технологий строительного производства, профессор
	Адамцевич Алексей Олегович, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», научно-исследовательская лаборатория физико-химического анализа, старший научный сотрудник
Ведущая организация:	**ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»**

Защита диссертации состоится 24 декабря 2026 года в 10^{00} часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, ауд. 3220.

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

Автореферат разослан «30» октября 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета — Макеев Алексей Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 не интегрированы в контур управления и 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 (3Д-печати)» (Договор № 32312234196 - 1/2023 с «ФАУ ФЦС», 2023 г.).

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.

Методология и методы исследования включают системный анализ технологического процесса как объекта управления; экспериментальные методы

сдвиговой и сдавливающей 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 индустриальном принтере.

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.

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, 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.

Публикации. Основные результаты и положения диссертационного исследования представлены в 6 публикациях, из которых 4 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК РФ, 2 - в изданиях, входящих в ядро РИНЦ. Получено 2 свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ; 2 патента на полезную модель, 1 свидетельство 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:

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

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

п.17 «Развитие системы контроля и оценки качества строительных материалов и изделий».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ научных подходов и прикладных разработок по проблеме управления технологическим циклом строительной 3D-печати. Установлено, что общая системная проблема заключается в отсутствии методов и способов непрерывного управления технологическим процессом, выявлен разрыв между проектной и технологической его стадиями. Необходим переход от открытого процесса, управляемого оператором по интуиции, к автомати-

зированной системе. Это требует решения комплекса задач: от точного прогнозирования поведения материала и изделия на всех стадиях печати до разработки комплексной системы контроля и регулирования технологического процесса. Сформулирована научная концепция исследований, заключающаяся в том, что создание единого цикла управления процессом 3D-печати будет основано на моделировании устойчивости 3D-печатных структур на проектной стадии, синхронизации контроля и регулирования процесса на технологической стадии. Обоснованы требования к способам и условиям регулирования режимов печати, основанные на анализе баланса сил в процессе транспортировки, экструзии и послойной укладки. В качестве инструмента прогнозирования устойчивости 3D-печатных структур определено численное моделирование в расчетном CFD-комплексе (ANSYS Fluent), реализующем методы вычислительной гидродинамики. Комплекс решений по управлению производственным циклом 3D-печати будет опираться на экспериментально установленные количественные взаимосвязи между изменением реологического поведения смесей, устойчивостью 3D-печатных структур и параметрами режимов печати при их варьировании.

Во второй главе обосновано факторное пространство, состав исследуемых систем (таблица 1), сырьевые материалы, представлены методы исследований.

Таблица 1 – Характеристика составов исследуемых систем*

Обозначение системы	В/Ц	Дозировка добавок, % от массы цемента		Соотношение по массе	
		МКЛ	СП	Ц : ИМ	Ц : П
Модельные системы					
Ц–В	0,28	-	-	-	-
Ц–В–СП	0,26	-	1,2	-	-
(Ц–В–СП–МКЛ)	0,26	2	1,2	-	-
Готовые к употреблению					
Микрозернистая, патент RU 2729283 C1 (Ц–В–СП–МКЛ–ИМ)	0,31	2	0,4	1 : 1	-
Мелкозернистая, патент RU 2729085 C1 (Ц–В–СП–МКЛ–П)	0,47	2	0,4	-	1:1,25

***Ц** - цемент CEM I 42,5R, **В** - вода, **СП** - суперпластификатор ФлейкАктив-160, **П** – песок кварцевый $d_{частиц}$ =0,16-1,2 мм, **ИМ** – известняковая мука $d_{частиц}$ =0,1-55 мкм, **МКЛ**– модификатор вязкости метакаолин «ВМК-45» (SiO_2 - 53 %, Al_2O_3 - 47 %, $d_{частиц}$ =1-5мкм)*

На первом этапе эксперимента выполнялось определение исходных граничных значений параметров процесса 3D-печати в зависимости от реологических характеристик смесей.

Экспериментальные исследования реологического поведения модельных и готовых к употреблению смесей (см. табл. 1) выполнены методами сдвиговой и сдавливающей реометрии. Реологическое поведение при сдвиге оценивалось по характеру полной реологической кривой, полученной на ротационном вискозиметре RHEOTEST 4.1. Реологическое поведение при сдавливании оценивалось методом сдавливания с постоянной скоростью деформирования 5 мм/с (метод Roussel'я). При проведении сдавливающих тестов формировали цилиндрические

образцы смесей размером $R = h_0 = 25$ мм, которые помещались между двумя гладкими пластинами, диаметр которых соответствовал размеру образца. Испытания проводили с помощью универсальной испытательной системы INSTRON 5982. Реологическое поведение характеризовалось по полученным кривым «приведенная нагрузка F^* − относительное изменение высоты образца h_i/R»; в точке перегиба кривой определялась величина предела пластичности $K_i(I)$.

Экспериментальные исследования условий обеспечения устойчивости модельных элементов в зависимости от реологических и технологических характеристик смеси производили на специально разработанном лабораторном прототипе строительного 3D-принтера (рисунок 1) при использовании модельных смесей. Варьировали вид смеси и режимы печати (скорость вращения шнека в экструдере, скорость движения экструдера). Контроль качества осуществляли фотофиксацией геометрии, качества экструдированного слоя, устойчивости и геометрии объекта.

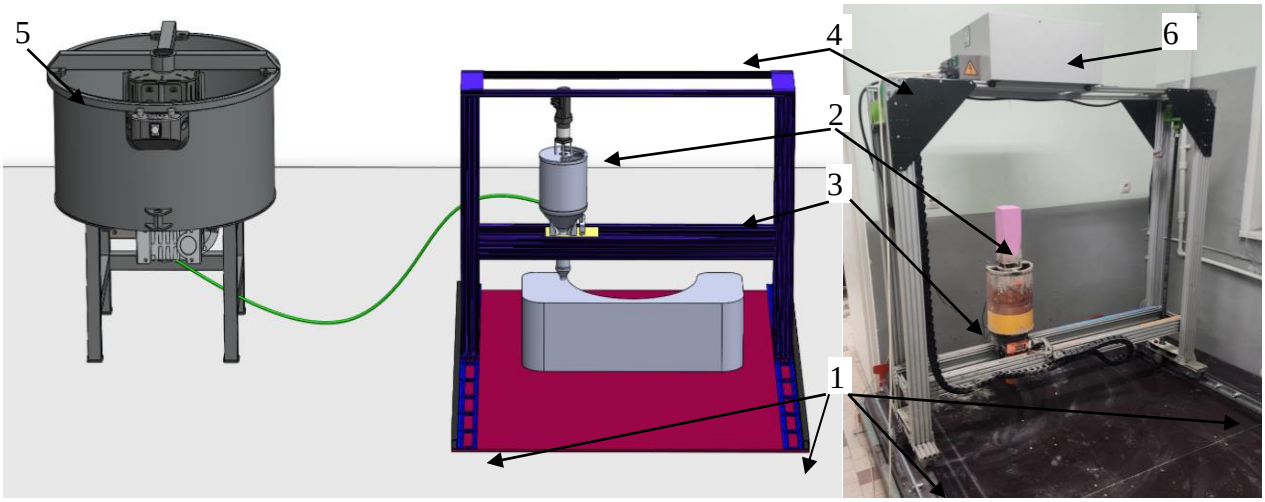


Рисунок 1 - Лабораторный 3D-принтер
Обозначено: 1 – направляющие рельсы, 2 – экструдер, 3 – балка перемещения по вертикальной оси, 4 – несущая рама, 5 – механизм подачи смеси, 6 – шкаф управления

Определение исходных граничных значений параметров процесса производили по результатам численного моделирования процесса 3D-печати и верификации его результатов при печати модельных элементов на лабораторном 3D-принтере. Реализация численного эксперимента проводилось в программном комплексе ANSYS Fluent версии R2023.1 при симуляции однослойной и многослойной печати. При моделировании варьировали параметры реологической модели Хершеля–Балкли и параметры процесса печати. Верификация результатов моделирования осуществилась путем сравнения дефектности и профиля поперечных сечений экструзионных слоев для смоделированных в ANSYS Fluent и напечатанных однослойных и многослойных модельных элементов.

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

Выполнена разработка и апробация автоматизированного прибора для оперативного контроля технологичности смеси (рисунок 2). Прибор разработан 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 ^{0}C 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 Geopocket S068.

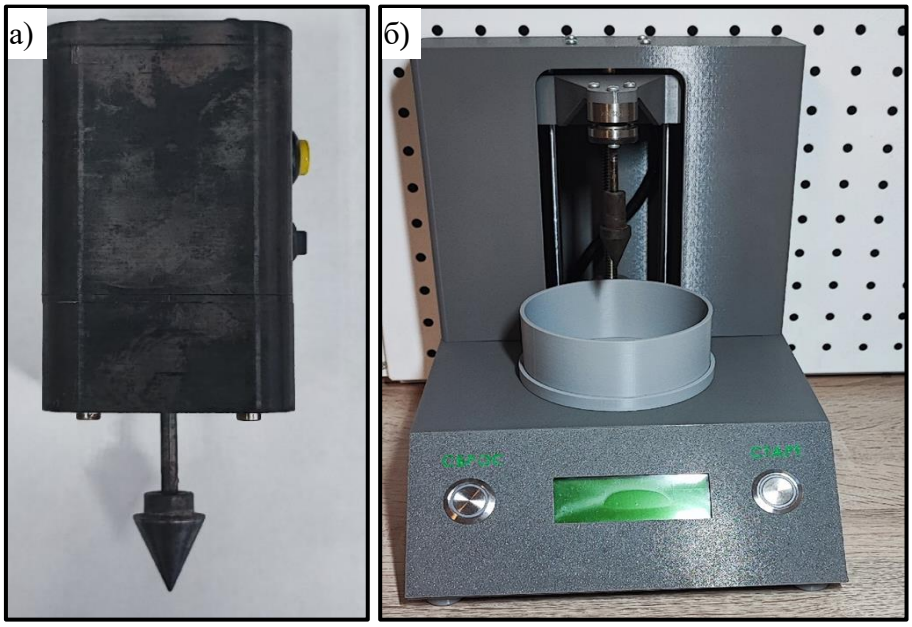


Рисунок 2 – Фото разработанных автоматических пластометров: а) для контроля на стройплощадке; б) для лабораторного контроля

При определении требований к параметрам контроля и диапазону регулирования технологических характеристик смесей для 3D-печати изучалось влияние значений пластической прочности на качество экструзионного слоя и устойчивость модельных печатных объектов, на прочностные характеристики 3D-печатных композитов. Качество экструзионного слоя и устойчивость модельных печатных объектов контролировалось в процессе печати прямолинейных элементов 40 × 300 × 160 мм на лабораторном 3D-принтере. Оценивались устойчивость объекта, геометрия слоя, его сплошность, относительные продольные и поперечные деформации слоев. Прочностные характеристики 3D-печатных композитов оценивались при испытаниях образцов, выпиленных из модельных печатных элементов на сжатие, изгиб, прочность сцепления слоев.

Исследования второго этапа эксперимента проводились на мелкозернистой готовой к употреблению смеси для 3D-печати (см. табл.1).

Третий этап исследований включал в себя определение требований к параметрам контроля и диапазону регулирования технологических режимов 3D-

печати. Выполнены эксперименты по установлению корреляционной взаимосвязи между значениями реологической характеристики (оценка предела текучести при сдавливании $K_i(I)$) и технологического (пластической прочности $P_{пл}$) параметра оценки пластичности смесей, а также по определению точки контроля $P_{пл}$. Варьируемым фактором выступала консистенция микрозернистых и мелкозернистых смесей (см. табл.1), контроль пластичности смеси осуществлялся после ее приготовления и на выходе из экструдера.

Определение требований к параметрам и диапазону регулирования технологических режимов 3D-печати в зависимости от характеристик смеси осуществлено на основании совокупных данных 3 этапов эксперимента.

Промышленная апробация разработанных методов контроля и управления процессом строительной 3D-печати проводилась на опытно-производственном участке Центра аддитивных технологий ВГТУ, оснащенном промышленным 3D-принтером «KEYCODE» модели «КРАФТЕР-У» (рисунок 3). Принтер изготовлен по техническому заданию, которое было 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).

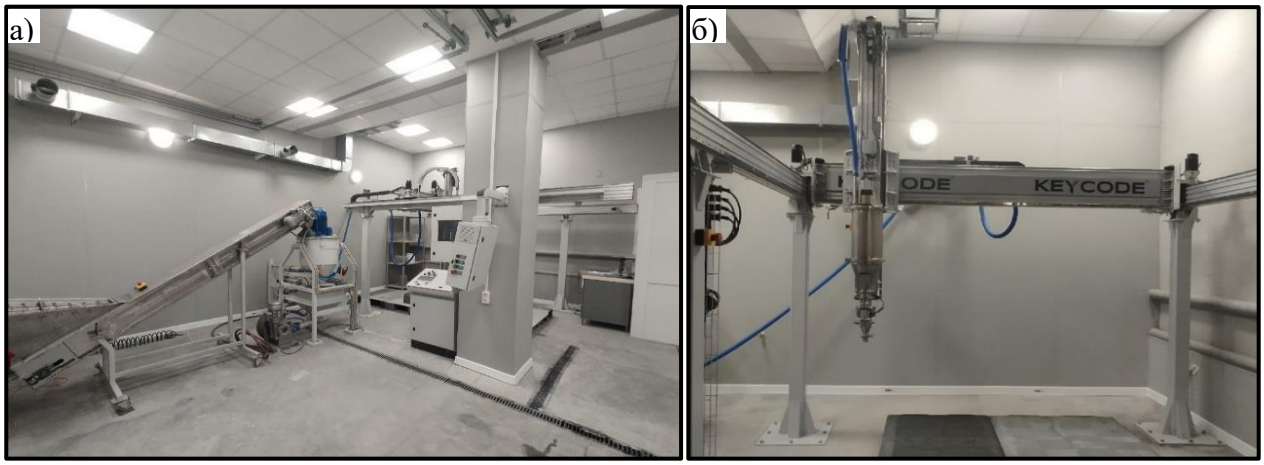


Рисунок 3 – Опытно-производственный участок Центра аддитивных технологий ВГТУ, оснащенный промышленным принтером модели «KEYCODE»: а) вид системы транспортирования и приготовления смеси; б) вид системы

Печать конструкций производилась с применением мелкозернистой смеси на кварцевом песке (патент RU 2729085, см. табл. 1). Апробация режимов печати производилась для трех базовых геометрических моделей (параллелепипед, цилиндр, куб). В процессе печати варьировались параметры процесса (скорость линейного перемещения, скорость вращения шнека экструдера, диаметр сопла, высота печатного слоя) и технологические характеристики смеси в соответствии с граничными значениями, установленными на втором и третьем этапе исследований с учетом фактора масштабирования. 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 их CAD-модели.

В третьей главе изложены результаты экспериментальных исследований реологических характеристик при сдвиге и сдавливании, технологических характеристик смесей для 3D-печати с использованием разработанного пластометра, результаты численного моделирования процессов печати и их верификации.

В результате исследования реологического повеления модельных цементных смесей при сдвиге они были отнесены к трем типам:

- смесь высокой жесткости (Ц – В), отличающаяся высокими значениями статической вязкости (η_0 = 800-900 Па·с при $\tau_{к1} \approx 30$ Па) и динамической вязкости (η = 200-300 Па·с при $\tau_{к2} \geq 50$ Па);

- смесь высокой текучести (Ц – В – СП), ее вязкость остаётся низкой во всём диапазоне напряжений сдвига (η_0 = 35-40 Па·с при $\tau_{к1} \approx 25$ Па, η = 5-10 Па·с при $\tau_{к2} \geq 300$ Па);

- пластичная смесь (Ц – В – СП – МКЛ), отличающаяся высокой статической вязкостьи (η_0 =300-350 Па·с при $\tau_{к1} \approx 200$ Па), но низкой динамической вязкостью (η =50-100 Па·с при $\tau_{к2} \geq 500$ Па).

По результатам экспериментов, включавших печать модельных элементов при фиксированной скорости вращения шнека (35 об/мин), выполнено сравнение результатов печати тремя типами смесей. Для жесткой смеси Ц - В (рисунок 4 а) экструзионные слои отличаются дефектностью, разрывами и изменением геометрии. Это обусловлено сочетанием высокой статической вязкости (850 Па·с) и низкого предела текучести ($\tau_{к2}$ = 31,9 Па). Уже для начальных слоев характерно нарушение геометрии и разрывы, а к концу печати дефекты накапливаются. Формирование сплошного контура становится невозможным.

Смесь высокой текучести (рисунок 4 б) на начальном этапе демонстрирует способность к экструзии благодаря низкой вязкости (η_0 = 38,6 Па·с), однако после укладки нескольких слоёв развивается прогрессирующее оплывание и расплывание слоёв. Это определяется низким значением статического предела текучести $\tau_{к1}$ = 23,3 Па.

При печати пластичной смесью (рисунок 4 в) на всём протяжении печати слои сохраняют стабильную форму, разрывы и оплывание слоев отсутствуют. Реологические характеристики данной системы (статическая вязкость η_0 =320 Па·с, предел текучести $\tau_{к1}$ = 252,6 Па) обеспечивают баланс между экструдируемостью и формоустойчивостью, то есть определяют ее пригодность для экструзионной безопалубочной 3D-печати. По результатам изучения реологического поведения готовых к употреблению мелко- и микрозернистых смесей установлено, что они характеризуются сходным пластическим поведением при сдвиге (рисунок 5 а), аналогичным по характеру кривой для модельной системы Ц – В – СП – МКЛ. Аппроксимация экспериментальной кривой вязкости пластичной цементной смеси, реализованная в вычислительной среде ANSYS FLUENT, показала, что ее реологическое поведение отвечает модели Хершеля-Балкли (рисунок 5 б).

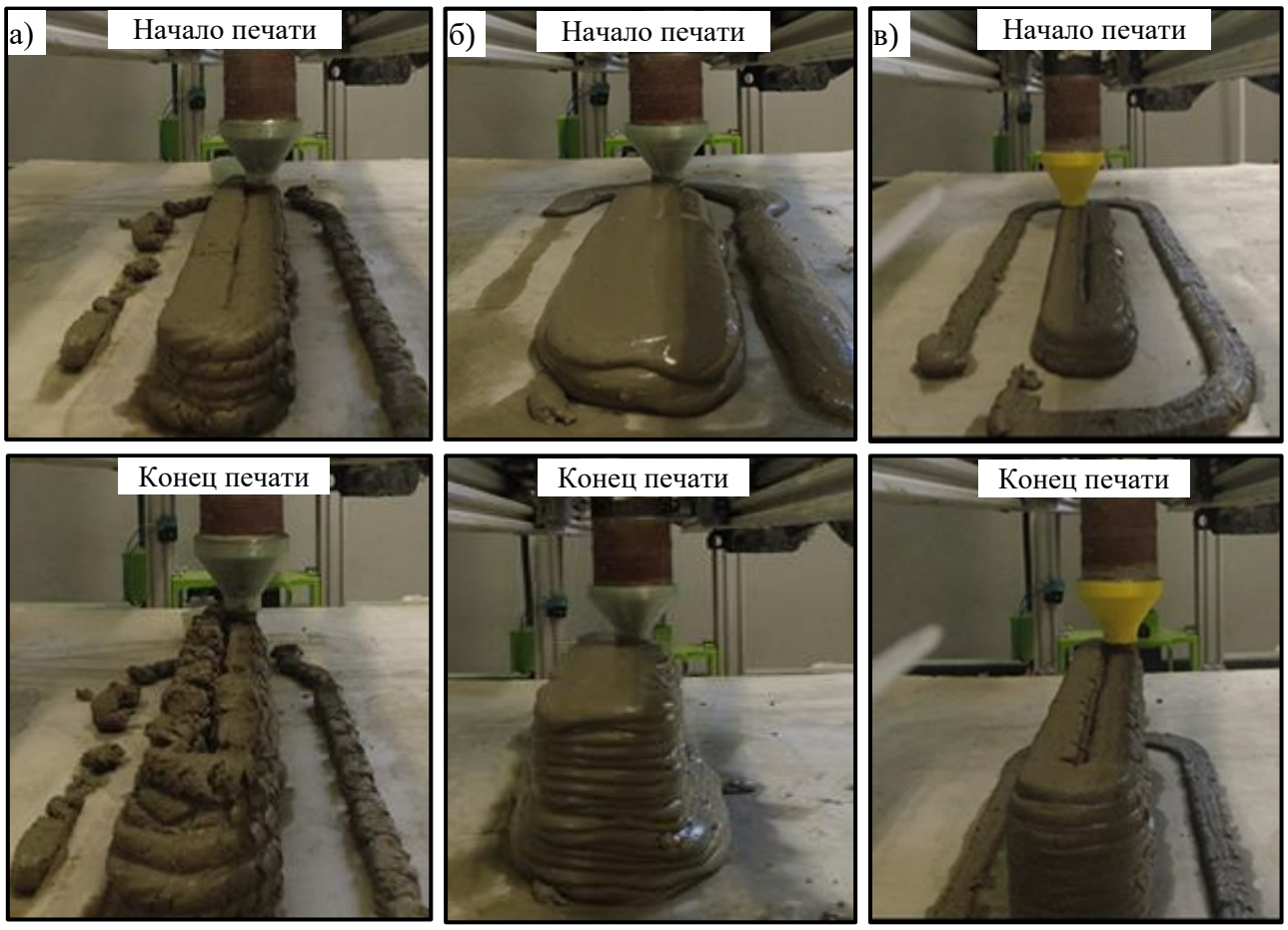


Рисунок 4 – Результаты 3D-печати модельного элемента
с использованием: а) жесткой смеси (Ц – В);
б) текучей смеси (Ц – В – СП); в) пластичной смеси (Ц – В – СП – МКЛ)

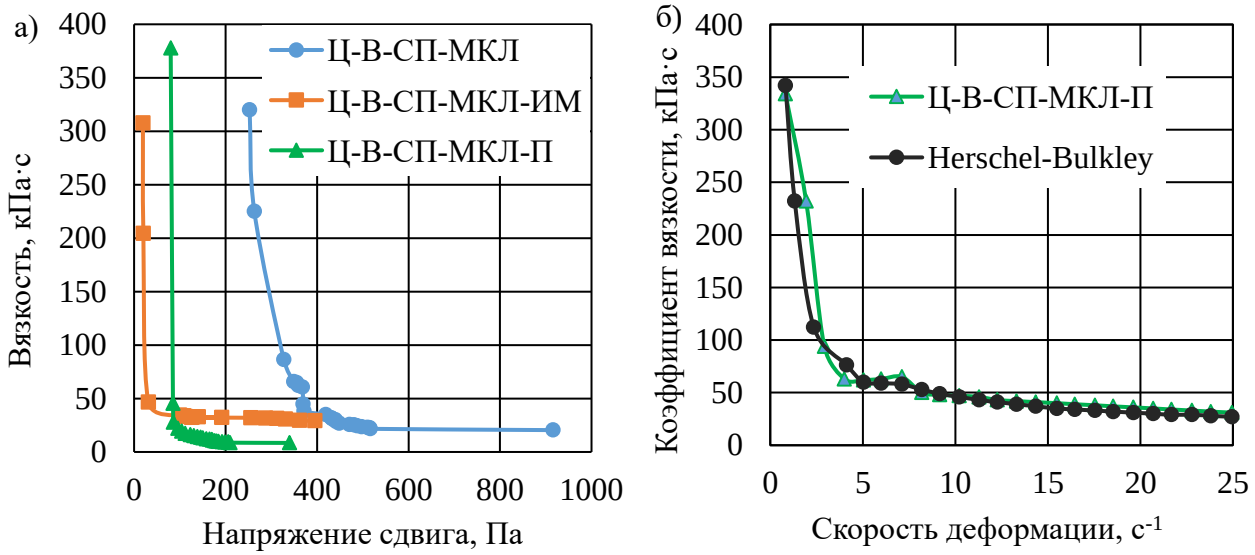


Рисунок 5 – Реологические кривые цементных систем при сдвиге
а) экспериментальные данные; б) аппроксимация экспериментальных
данных по модели Хершеля-Бакли

Выявлена аналогия реологического поведения при сдвиге и сдавливании (рисунок 6). При сдавливании также фиксируется зона устойчивости, соответствующая преодолению начального предела пластичности, зона течения с интенсивно разрушаемой структурой, аналогичная зоне переменной вязкости на кривых сдвиговой реометрии. Поэтому полученные экспериментальные реологические характеристики были использованы в качестве исходных данных для численного моделирования процесса 3D-печати (таблица 2).

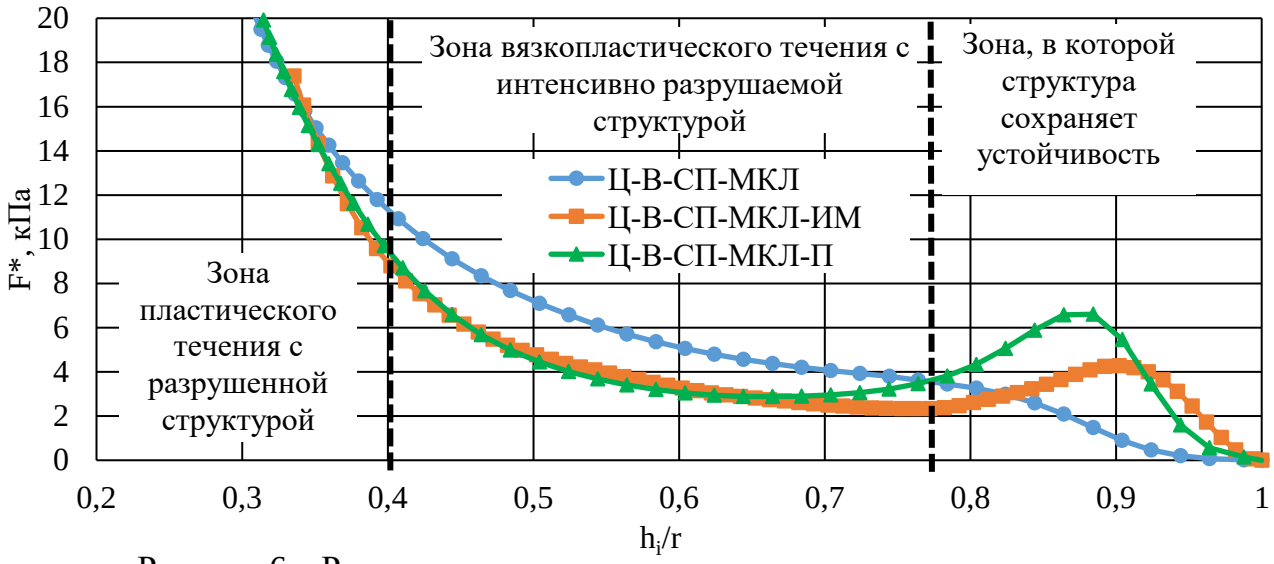


Рисунок 6 – Реологические кривые цементных систем при сдавливании

Таблица 2 – Исходные данные для моделирования

Экспериментальные данные (Data)		Параметры модели Хершеля-Балкли (HB)	
Характеристики смеси	Значения	Наименование	Диапазон
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^*_0, Па·с	225,1	Коэффициент вязкости K, Па·с^n	20-250
Статический предел текучести $\tau_{к1}$, Па	252,6	Индекс степенного закона n	0,30-0,75
Предел текучести $\tau_{к2}$ (по Бингаму), Па	271,3		

На основании результатов численного моделирования и их экспериментальной верификации (рисунок 7) установлено, что реологическая модель Хершеля-Балкли обеспечивает достоверное прогнозирование геометрии печатных слоёв и устойчивости 3D-печатных объектов. Полученное расхождение по толщине слоя в пределах 3-9% позволяет рекомендовать данную модель для практических инженерных расчётов технологических режимов.

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

1) граничные значения входных реологических параметров смеси для численного моделирования: предел текучести τ_0 = 200-600 Па; индекс степенного закона модели Хершеля-Балкли n = 0,3-0,75; коэффициент вязкости K = 25-250 Па·с^n;

2) диапазон регулирования параметров процесса 3D-печати: диаметр сопла 10-25 мм; скорость подачи материала U = 10-25 см^3/с; скорость движения сопла V = 10-35 мм/с; параметр относительной скорости перемещения сопла V/U = 1,0-1,4.

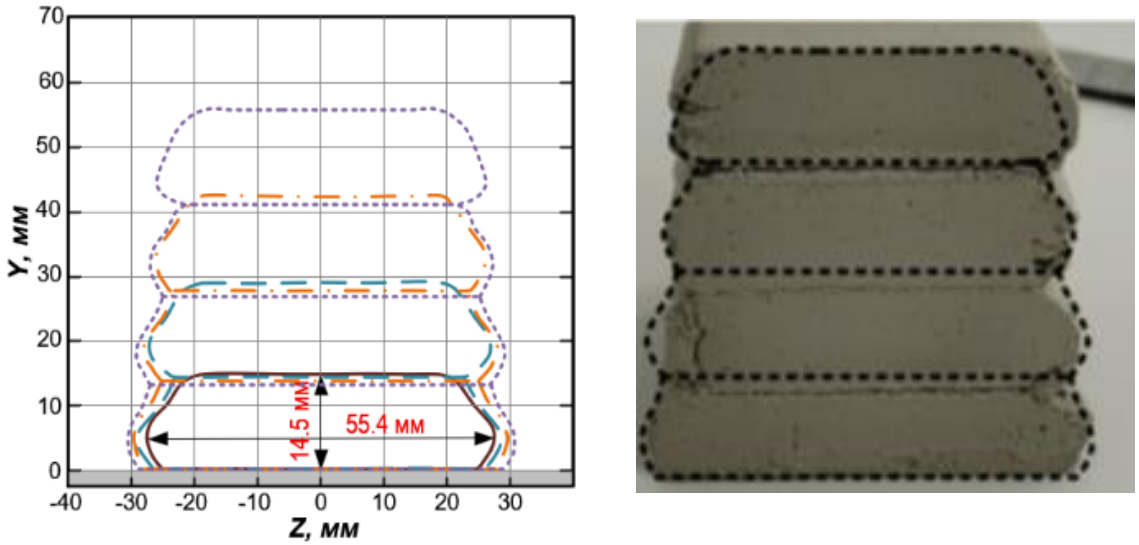


Рисунок 7 – Численная симуляция (а) и верификация (б) профиля слоев при 3D-печати

Апробация разработанного пластометра для измерения технологических свойств неорганических строительных смесей показала, что он превосходит стандартный грунтовый пенетрометр по чувствительности. Преимуществом также является автоматизация передачи усилия на смесь и обработки измерений. Прибор оснащён тензометрическим датчиком усилия, микроконтроллерным блоком обработки сигнала и дисплеем, на который выводится рассчитанное значение пластической прочности $P_{пл}$. Диапазон измерений пластической прочности составляет $P_{пл}$ = 0,4-4,0 кПа, что полностью перекрывает область технологически значимых состояний смеси для строительной 3D-печати.

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:

$$P_{пл} = 0{,}97 \cdot K_i(I) - 0{,}45 \quad (1)$$

Установленная зависимость с достаточной для практики точностью (коэффициент достоверности аппроксимации R^2 = 0,81) позволяет прогнозировать технологичность смеси на основе экспресс-измерений пластической прочности $P_{пл}$, 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.

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 контролировалось качество модельных вертикальных элементов (стен) и прочность слоистых образцов бетона.

По критерию обеспечения качества экструзионных слоев и устойчивости элементов технологический диапазон значений пластической прочности свежеприготовленной смеси составляет $P_{пл}$ = 0,8-2,8 кПа (рисунок 8). При $P_{пл} \leq 0,8$ кПа наблюдается прогрессирующая потеря формоустойчивости, свежеуложенные слои подвержены оплыванию, нижние слои не выдерживают веса вышележащих. При $P_{пл} \geq 2,8$ кПа фиксируется зона появления дефектов слоёв, связанных с недостаточной пластичностью смеси и ухудшением межслоевой адгезии. Одновременно в диапазоне $P_{пл}$ = 0,8-1,8 кПа гарантировано минимальное изменение прочностных показателей при сжатии и изгибе слоистого 3D-печатного бетона по отношению к материалу слоя.

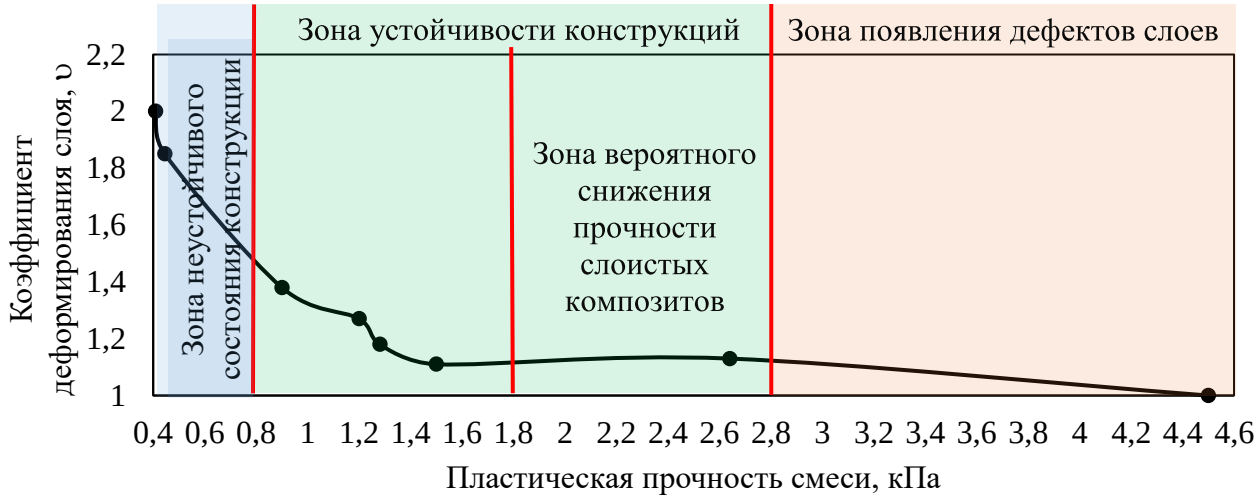


Рисунок 8 - Взаимосвязь между значениями показателя пластической прочности смеси и качеством модельных стеновых 3D-печатных элементов

По результатам опытной печати на лабораторном 3D- принтере и сопоставления экспериментальных данных с результатами численного моделирования установлены количественные требования к диапазону регулирования технологических режимов. Рабочий интервал показателя пластичности $P_{пл}$ 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, компенсирующая вариативность их свойств и обеспечивающая стабильное качество изделий.

В **четвертой главе** представлены результаты опытно-промышленной апробации разработанных методов управления и контроля производственным циклом строительной 3D-печати на производственной площадке ВГТУ.

На основании данных апробации уточнены полученные в ходе экспериментальных исследований диапазоны характеристик смеси и параметров процесса, обеспечивающих устойчивость 3D-печатных структур. Рекомендации задают начальные значения управляющих параметров, гарантирующие устойчивое послойное возведение конструкций из цементной смеси с известным показателем пластической прочности (таблица 3).

Таблица 3 – 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, Па·с		15-20	20-24	24-28
Предел текучести $\tau_{к1}$, Па		40-65	65-85	85-105
Оценка предела пластичности (при сдавливании) Ki(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		1,57-2,46	2,13-2,61	1,73-2,13
Скорость вращения шнека, об/мин	Задаваемая в программе	120-160	280-290	280- 290
	Фактическая	8-11	18-19	18- 19

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 9).

Алгоритм управления включает следующие шаги:

1. Проектирование CAD-модели и подготовка G-кода производится на основании технического задания и архитектурного эскиза. Цифровая модель изделия проверяется на принципиальную возможность печати.

2. Входной контроль диапазона пластической прочности $P_{пл}$ смеси для определения формоустойчивости и экструдируемости. Эти значения передаются для моделирования процесса.

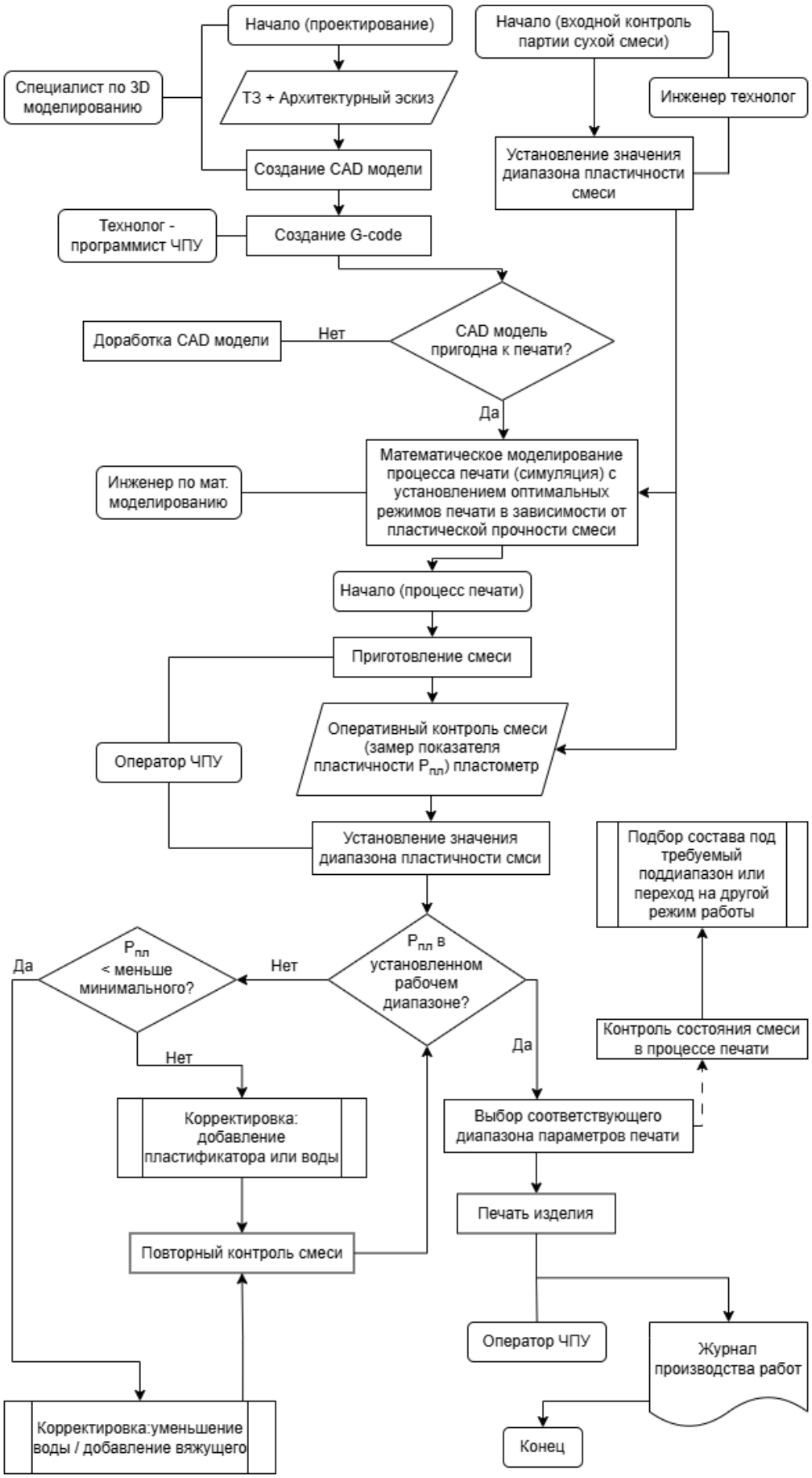


Рисунок 9 – Блок схема управления производственным циклом 3D-печати

3. Для моделирования используется CFD-пакет ANSYS Fluent и реологическая модель Хершеля-Балкли. В результате моделирования для каждого значения $P_{пл}$ внутри диапазона определяются оптимальные технологические параметры процесса, для каждого из которых формируется свой набор уставок.

4. Предпечатный контроль и запуск. На производство передается управляющая программа (G-код) и «Карта» параметров процесса. Непосредственно перед началом работы выполняется измерение фактической пластической прочности $P_{пл}$ смеси. В соответствии с ее значением назначаются параметры процесса уставки скорости перемещения сопла, высоты слоя и частоты вращения шнека.

5. В ходе печати осуществляется непрерывный мониторинг состояния смеси не реже одного раза в 15 минут, а также после каждой загрузки новой порции смеси, в соответствии с ее значением корректируется режим печати.

6. По окончании печати выполняется визуально-измерительный контроль геометрии готового изделия.

На основании предложенного алгоритма разработаны и внедрены практические рекомендации по контролю и управлению производственным циклом строительной 3D-печати.

Разработанные CAD-модели малых архитектурных форм прошли независимую экспертизу соответствия параметрам печати на строительном 3D-принтере. Методика цифрового моделирования процесса 3D-печати апробирована компанией ООО «КЕЙКОД» при изготовлении строительных 3D-принтеров.

Эффективность внедрения разработанной системы управления и контроля определяется экономией временных ресурсов, снижением затрат на отделку поверхности, снижением потерь от брака. Внедрение разработанной процедуры и средств контроля в цехе 3D-печати ООО «БетоникАРТ» 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%.

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 $P_{пл}$ 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 η_0 = 360-390 Па·с, динамическая вязкость η = 15-28 кПа·с, предел текучести $\tau_{к1}$ = 40-105 Па, оценка предела пластичности. (при сдавливании) $K_i(I)$ = 0,8-1,2 кПа;

2) граничные значения входных параметров для численного моделирования: предел текучести τ_0 = 250-750 Па; индекс степенного закона модели Хершеля-Балкли n = 0,4-0,85; коэффициент вязкости K = 80-350 Па·с^n;

3) диапазон регулирования параметров процесса 3D-печати - диаметр сопла 20-30 мм; скорость подачи материала U = 40-80 см^3/с; скорость движения сопла V = 50-83 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.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. 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.

2. **Юров П.Ю.**, Каракчи-Огли Д.Р. Влияние технологических свойств цементной смеси на качество слоистых 3D-печатных элементов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2025. – № 1(62). – С. 139–154. – DOI: 10.24866/2227-6858/2025-1/139-154. – EDN HIZOBF.

3. 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.

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

Публикации в других изданиях

5. **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, промышленной и производственной инженерии (MPCPE-2024) : сборник трудов V Международной научно-технической конференции, Владимир, 23–25 апреля 2024 года. – Владимир: АРКАИМ, 2024. – С. 264–272. – EDN EHSVZV.

6. **Юров П.Ю.**, Бритвина Е.А., Славчева Г.С. Разработка требований к параметрам технологического комплекса для строительной 3D-печати // Научная опора Воронежской области: сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2021. – С. 254–256. – EDN TFWWWS.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026610930 Российская Федерация. Программа для устройства измерения пластичности неорганических паст / **Юров П.Ю.**; заявитель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – Заявл. 26.12.2025; опубл. 16.01.2026. – EDN BDCOGR.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026661582 Российская Федерация. Программа для устройства измерения пластичности неорганических паст / **Юров П.Ю.**; заявитель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – Заявл. 27.02.2026; опубл. 22.04.2026. – EDN ICTXEM.

Патенты на полезные модели

9. Патент на полезную модель № 244065 U1 Российская Федерация, МПК G01N 3/28. Устройство для измерения пластичности неорганических паст / **Юров П.Ю.**, Славчева Г.С., Бабенко Д.С., Левченко А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – Заявл. 22.12.2025; опубл. 15.06.2026. – EDN VHMCUT.

10. Патент на полезную модель № 244271 U1 Российская Федерация, МПК G01N 11/00. Устройство для измерения пластичности неорганических паст / **Юров П.Ю.**, Славчева Г.С., Каракчи-Огли Д.Р., Левченко А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – Заявл. 27.02.2026; опубл. 23.06.2026. – EDN ZVJGRP.

Свидетельство на секрет производства (ноу-хау)

11. № 2022001 «Технологический комплекс для строительной 3D-печати» / Славчева Г.С., Каракчи-Огли Д.Р., **Юров П.Ю.**, Резанов А.А.; правообладатель ВГТУ. – Опубл. 07.11.2022.

Подписано в печать 20.10.26 г. Формат 60х84 1/16. Бумага писчая. Усл. п. л. 1,4. Тираж 80 экз. Заказ № 148 Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84