

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

«Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

На правах рукописи



Лавров Иван Юрьевич

**ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ
ВИБРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д-р техн. наук, профессор,

Береговой Виталий Александрович



ПЕНЗА 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. Современное состояние и перспективы развития технологии получения высокофункциональных бетонов с регулируемыми вибродинамическими показателями	13
1.1 Специфика составов и опыт применения высокофункциональных бетонов в монолитных вибронагруженных конструкциях различного назначения	15
1.1.1 Строительство уникальных зданий и сооружений	15
1.1.2 Промышленное и транспортное строительство	16
1.2 Критерии оптимизации высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов для объектов промышленного строительства	29
1.3 Вибродинамические свойства материалов с жесткофиксированными структурными связями	32
1.3.1 Механизмы демпфирования	32
1.3.2 Основные составляющие демпфирования	34
1.4 Современные способы исследования вибродемпфирующих свойств	37
1.4.1 Экспериментальные методы	37
1.4.2 Расчетные методы	39
1.5 Выработка критериев оптимизации и их иерархизация в рамках поставленной задачи.....	42
Выводы по главе 1	43
ГЛАВА 2. Характеристика исходных материалов, методы исследований и методология работы.....	46
2.1 Характеристика применяемых сырьевых материалов	46
2.1.1 Вяжущие вещества (портландцементы)	46
2.1.2 Добавки-модификаторы бетонных смесей и бетонов.....	48
2.1.3 Заполнители и фибра	49
2.2 Приборы и методы исследования свойств.....	50
2.2.1 Стандартные методы.....	50
2.2.2 Авторские методы и испытательное оборудование.....	52
2.3 Методологическая основа исследований.....	66
2.4 Планирование эксперимента и математическая обработка результатов	68

2.4.1 Методы математического планирования эксперимента.....	68
ГЛАВА 3. Разработка составов высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов.....	69
3.1 Прогнозирование диссипативных свойств цементных композитов.....	69
3.1.1 Феноменологическое описание закономерностей влияния рецептурно-технологических факторов на процессы структурообразования, определяющие формирование структурозависимых вибродинамических свойств.....	75
3.1.2 Разработка авторской методики и инструментария для экспериментальной оценки диссипативных свойств цементных композитов	81
3.2 Разработка составов и исследование свойств высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов.....	96
3.2.1 Модифицирование составов и выработка механизмов эффективного регулирования вибродемпфирующих показателей.....	107
3.2.2 Химическое аппретирование поверхности зерен инертной части	112
3.2.3 Влияние дисперсного армирования и добавки суперабсорбирующего полимера на свойства высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов	115
3.2.4 Оптимизация режимов твердения	121
Выводы по главе 3	127
ГЛАВА 4. Оптимизация составов. Исследование структурообразующих процессов и свойств высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов	128
4.1 Исследование и оптимизация составов бетонных смесей по реотехнологическим свойствам	128
4.2 Выбор пластификаторов и микродобавок по их влиянию на кинетику гидратации	132
4.3 Выбор добавок-компенсаторов усадки	137
4.4 Влияние модифицирующих добавок на минерально-фазовый состав и микроструктуру.....	146
4.5 Многокритериальная оптимизация составов. Показатели составов оптимизированных высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов.....	147
4.6 Оценка долговременной прочности и деформаций ползучести. Прогноз длительности эксплуатации в различных режимах.....	151

Выводы по главе 4	152
ГЛАВА 5. Экспериментальная апробация и оценка технико-экономической эффективности применения высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов.....	154
5.1 Экспериментальная апробация	154
5.2 Защитная пропитка поверхности бетона в условиях эксплуатации. Исследование гидрофобизирующих составов для поверхностной пропитки	160
5.3 Исследование свойств разработанных высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов в различных режимах работы.....	161
5.4 Описание принципиальной технологической схемы получения высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов	165
5.5 Оценка экономической эффективности разработанных составов.....	174
Выводы по главе 5	175
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	176
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	179
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	181
Приложение А. Акты внедрения	193
Приложение Б. Диплом победителя программы «УМНИК» (Пензенская область).....	198

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Развитие научных основ материаловедения и компетенций в рамках химизации технологии бетона позволили создать принципиально новые виды цементных композитов с уникальным набором технологических и физико-механических свойств. Из них можно выделить разновидности, получившие промышленное внедрение и внесенные в нормативные документы – реакционно-порошковый (РПБ, RPC), самоуплотняющийся (СУБ, SCC), высоко- и ультравысокофункциональный (ВФБ УВФБ, НРС, УНРС), ультравысококачественный (UHLB) и сверхвысокопрочный (HSC) бетон. Номенклатура основных компонентов большинства составов аналогична, различия касаются вводимых добавок и специфики модифицирования. В технологическом и техническом аспектах высокофункциональные самоуплотняющиеся бетоны (ВФСУБ) обладают исключительно высоким потенциалом совершенствования своих структурозависимых свойств, обусловленный разнообразием применяемых сырьевых компонентов и химических добавок.

Процесс принятия оптимального варианта проектного решения при строительстве промышленных объектов ограничен компромиссом между стоимостью, качеством и сроками реализации, что существенно влияет на выбор применяемых материалов. Современные конструкционные материалы на основе железосодержащих сплавов не всегда отвечают требованиям промышленного строительства, а технологии их применения основаны на использовании энергозатратных и потенциально опасных высокотемпературных процессов (плавление, литье, сварка и т.п.). Это вызывает потребность в разработке конструкционных минеральных материалов гидратационного типа твердения, обладающих сопоставимыми показателями прочности, жесткости, демпфирования, вибро- и теплостойкости. В этом плане большими перспективами обладают высокопрочные самоуплотняющиеся бетоны. Эффективное сочетание свойств бетонной смеси и затвердевшего бетона позволяет по-новому оценить потенциал их применения в качестве конструкционных материалов для объектов промышленного строительства, включая смежные области станкостроения и машиностроения. Во многих случаях их использование может стать предпочтительной альтернативой металлическим сплавам, традиционно применяемым для отливки массивных частей промышленного оборудования.

Конкурентоспособность цементного литья обусловлена высокими динамическими и технологическими показателями, например, коэффициент демпфирования бетонов в

47 раз превышает аналогичный показатель чугуна. По опубликованным данным технологии, основанные на применении бетона в станкостроении, позволяют снизить металлоёмкость изделий (до 85 %) и стоимость (до 65 %).

Степень разработанности темы исследования. Разработкой научно-технологических основ получения и формирования оптимальных параметров микро- и макроструктуры композитов на основе высокопрочных цементных матриц занимались отечественные и зарубежные ученые-материаловеды: J.H. Brouwers, M. Collepardi, P.L. Domone, S. Hanehara, K. Ozawa, H.J. Radix, Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.Т. Ерофеев, В.И. Калашников, С.С. Каприелов, П.Г. Комохов, В.С. Лесовик, Г.В. Несветаев, В.Л. Хвастунов, Е.М. Чернышев.

Из авторов работ, посвящённых проблематике применения бетонов в вибронагруженных конструкциях промышленного строительства, включая элементы технологического оборудования, можно выделить: Stefan Henze, Konrad Hinrichsmeyer, Matthias Kalthoff, Chaofeng Liang, Jinxu Mo, Michael Raupach, Marco Wolf, Jianzhuang Xiao, Wenhua Zhang, М.И. Браиловский, В.И. Калашников, С.М. Скоробогатов, В.Н. Тригалева, В.О. Чеботаревич [1 – 4].

Анализ опубликованных работ показывает целесообразность проведения исследований, направленных на разработку технологии получения цементных бетонов на новом техническом уровне, способном приблизить (по ряду показателей превысить) показатели их физико-механических свойств в сравнении с промышленными металлами. Нерешёнными остаются вопросы оптимизации составов бетонов с учётом вибрационно-силовых характеристик различных типов обрабатывающих процессов, а также оценка влияния рецептурно-технологических факторов на вибродемпфирующие показатели и долговечность модифицированных цементных матриц при воздействии циклических нагрузок. Актуальна также проблематика детального исследования всего спектра свойств таких бетонов для более эффективного использования возможностей компьютерного мультифизического моделирования и повышения точности расчетных данных.

До настоящего времени не решены задачи негативного влияния кремниевокислотных минеральных добавок на замедление процессов твердения в бетонах с минимальным водоцементным показателем, а также управления формированием гомогенных микроструктур цементного камня с пониженной аутогенной усадкой.

Цель и задачи исследования. Целью являлась разработка составов и научно-обоснованной технологии получения высокопрочных самоуплотняющихся бетонов с регулируемыми вибродемпфирующими и деформативными показателями для изготовления способом свободной заливки промышленных конструкций, включая силовые элементы технологического и станочного оборудования.

В соответствии с поставленной целью решались задачи:

- выявление химико-технологических факторов, обеспечивающих получение цементных композитов с повышенными показателями демпфирующих свойств, механической прочности, жесткости и усадки;
- совершенствование методов и научно-исследовательской базы для экспериментальной оценки вибродинамических и деформативных показателей цементных бетонов;
- прогнозирование диссипативных свойств гетерогенных цементных материалов с использованием существующих средств численного моделирования и их сравнение с опытными данными, полученными на испытательном оборудовании усовершенствованной конструкции;
- разработка составов ВФСУБ по заранее заданным вибродинамическим и деформативным показателям;
- исследование физико-механических свойств разработанных ВФСУБ и границ их оптимизации.

Научная новизна работы

С использованием системного подхода и на основе фундаментальных научных положений механики композиционных материалов применительно к цементным бетонам установлены механизмы формирования вибродемпфирующих и деформативных свойств в зависимости от структурообразующих химико-технологических факторов.

Разработана научно-обоснованная технология получения высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов с заданными вибродемпфирующими и деформативными показателями, основанная на полиструктурном подходе к управлению процессами формирования свойств и предполагающая: на микроуровне – модифицирование цементно-водно-дисперсной матрицы бетона добавками сульфоалюминатного состава, увеличивающими энтропийный фактор микроструктуры, а также добавками, снижающими влажностную составляющую усадки за счёт редуцирования капиллярных сил в микрометрических и субмикрометрических порах твердеющего цементного камня; на мезо-

уровне – создание в зонах контакта промежуточного демпфирующего слоя из эластичного кремнийорганического полимера; на макроуровне – оптимизация заполнителей по гранулометрии, плотности, адгезии к цементной матрице;

Установлена взаимозависимость минерально-фазового состава и вибропоглощающей способности бетона, заключающаяся в преимущественном влиянии относительного содержания этtringита и степени закристаллизованности микроструктуры на диссипативные свойства цементного камня. Снижение содержания добавок микрокремнезёма и метакрилина также повышает показатель демпфирования бетона, что связано с торможением процесса формирования этtringита в присутствии пуццолановых добавок.

Доказана эффективность создания промежуточного демпфирующего слоя из эластичного кремнийорганического полимера между поверхностью частиц заполнителя и цементной матрицей, рассеивающего энергию изгибных колебаний при вибрационном воздействии. Установлено, что введение в состав до 5 % заполнителя в виде стальных шариков с демпфирующим силиконовым покрытием увеличивает величину демпфирования на 45–60 %.

Получены закономерности компенсации усадочных деформаций твердеющей цементной системы, основанные на капиллярных эффектах. Показана перспективность совместного применения расширяющих добавок сульфоалюминатного состава и добавок на основе аминоалкиловых эфиров этиленгликоля, снижающих поверхностное натяжение внутрипоровой жидкости и капиллярные стягивающие силы, с целью снижения деформаций усадки бетона.

Теоретическая и практическая значимость работы. В диссертации изложены научно-обоснованные технические и технологические решения получения ВФСУБ для промышленных и специальных конструкций, способных эффективно демпфировать вибрацию в амплитудно-частотных диапазонах, характерных для основных типов обрабатывающего оборудования.

Установлен рост логарифмического декремента колебаний образцов бетона на 10–12 % при повышенных (10–12 %) дозировках сульфоалюминатной расширяющейся добавки (на примере Denka CSA20), усиление положительного эффекта на 4–5 % может быть достигнуто введением модификатора поверхностного натяжения (бутилцеллюлоза) в количестве 1,5–2 %. При этом направление хода изменения величины демпфирования (с одновременной фиксацией снижения динамического модуля упругости), ука-

зывает на повышение структурной неоднородности модифицированного цементного камня. В практическом плане совместное введение Denka CSA20 и бутилцеллозоля позволяет в 1,6 раза сократить расход дорогостоящей расширяющейся добавки для изготовления малоусадочных и безусадочных бетонов.

Исследовано влияние минеральных добавок на прочность твердеющего цементного камня. Установлены количественные показатели повышения прочности на сжатие цементных композиций в зависимости от вида (количества) вводимого пластификатора и микрофибры. Так, введение в бетон до 2 % волокон (по объему) полимерной фибры приводит к незначительному снижению величины E_d (1,5–3,0 %) при неизменной величине демпфирования, а стальной фибры – повышает E_d , снижая величину демпфирования на 5–7 %. Увеличение содержания стальных волокон до 3 % сопровождается ростом прочности на сжатие со 136 до 153 МПа и на изгиб (от 18 до 35,4 МПа), а также ростом модуля упругости на 20–23 %.

Методом полуадиабатической калориметрии на испытательной установке оригинальной конструкции проведена оценка эффективности различных вариантов сочетаний активной минеральной добавки и пластификатора по параметрам продолжительности индукционного периода и экзотермии гидратации цементно-водно-дисперсной матрицы. Это позволило разработать алгоритм экспресс-оценки пригодности вновь вводимых модификаторов бетонной смеси, легко реализуемый на практике в условиях заводской лаборатории для решения задач корректировки составов существующих рецептур.

Осуществлён подбор рецептур цементного литья из отечественного сырья, по своим техническим показателям соответствующие уровню признанных мировых производителей. Определена технико-экономическая эффективность ВФСУБ в сравнении с зарубежными аналогами: снижение показателя себестоимости для разработанных составов составляет 20675 руб. за 1 т материала.

Из разработанных ВФСУБ изготовлены и прошли практическую апробацию сборные железобетонные станины в составе конструкций следующих прототипов оборудования: разрывная машина, комплексы для механических испытаний бетонов (деформативность, вибродемпфирование). На примере фрезерного ЧПУ-станка с несущим бетонным каркасом проведен анализ работы ВФСУБ в различных режимах вибрационной нагрузки, генерируемой при эксплуатации промышленного оборудования.

Разработанное оборудование активно используются в учебной и научно-исследовательской деятельности кафедры «Технологии строительных материалов и деревообработки» (ПГУАС), практическое применение получили составы ВФСУБ, разработанные для станин высокоточного оборудования по заказу ООО «Скай Технолоджи 2015» (ТОР «Железногорск») (НИР №23-01 «Разработка технологии получения самоуплотняющихся бетонных смесей для станин высокоточного оборудования» от 16.01.2023) (Приложение А).

Проекты, выполненные в рамках диссертационных исследований, были поддержаны грантами: «УМНИК» (Разработка лабораторного комплекса для реализации аддитивных технологий создания композиционных материалов способом 3D-печати и фрезерования, №16967ГУ/2021, 2021 г.) (Приложение Б); РНФ (Оптимизация аддитивной технологии для производства малых архитектурных форм, №23-79-01047, 2023 г.).

Методология работы и методы исследования. Методологическая основа базируется на анализе результатов работ отечественных и зарубежных ученых в области создания высокофункциональных бетонов с применением алгоритмов математического анализа и численного проектирования структурно-зависимых показателей. В исследованиях использованы стандартные методы оценки параметров структуры и свойств материалов, а также апробированные на практике методики математического планирования экспериментов и статистической обработки полученных данных.

Изучение влияния режимов работы промышленного оборудования на напряженно-деформируемое состояние разработанных бетонов в отдельных узлах конструкций осуществлено методом численного моделирования, проведенного на основе экспериментально установленных показателей свойств материала. Валидация данных компьютерного моделирования и натурных экспериментов реализована посредством анализа откликов, снятых с характерных зон и сечений конструкций, испытывающих вибрационное воздействие при работе прототипа типового промышленного оборудования, изготовленного с применением ВФСУБ.

Положения, выносимые на защиту. Теоретическое и экспериментальное обоснование принципов формирования вибродемпфирующих показателей ВФСУБ, обеспечивающих их долговременную эффективную работу в амплитудно-частотном диапазоне вибраций, генерируемых типовым промышленным оборудованием.

Рецептурно-технологические закономерности, определяющие принципы проектирования составов, и позволяющие получить ВФСУБ для литья элементов силовых конструкций промышленного оборудования, включая базовые детали и основания, с заданными показателями вибродемпфирования, прочности, усадки, ползучести.

Результаты численных и натурных исследований поведения ВФСУБ под нагрузками, возникающими в массивных конструктивных элементах механообрабатывающего оборудования, и их анализа с целью адаптации технологий цементных бетонов под потребности промышленного строительства, включая смежные области станко- и машиностроения.

Методики проведения испытаний и экспериментальное научно-исследовательское оборудование для оценки показателей вибродемпфирования, усадки и ползучести бетонов, а также совместимости компонентов разрабатываемых составов.

Степень достоверности результатов работы подтверждается использованием современных методов исследований, аттестованного и поверенного научного оборудования, соответствием процедур испытаний рекомендациям действующих нормативных документов, а при их отсутствии – методикам, приведенным в общепризнанных научно-исследовательских трудах.

Объект исследования. Высокофункциональные самоуплотняющиеся мелкозернистые бетоны с улучшенными показателями вибродинамических и деформативных свойств для монолитных силовых конструкций промышленного и специального назначения.

Предмет исследования. Параметры управления физико-химическими процессами формирования структурно-зависимых свойств высокопрочных цементных литевых композитов с заранее заданными вибродемпфирующими и деформативными показателями.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на конференциях: XIII, XIV, XV, XVII и XVIII Международных научно-технических конференциях молодых ученых, посвященных памяти профессора В.И. Калашникова (Пенза: ПГУАС, 2018-2023 гг.); XII Международной научно-технической конференции Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе (Саратов: СГТУ им. Гагарина Ю.А., 2024); I Международной конференции молодых ученых «Решения современных проблем материаловедения и

технологии в строительстве, ВладСтройТех-2024» (доклад – победитель (1 место) в конкурсе молодых ученых); 7th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (г. Сочи, 2024 г.); 10th International Conference on Industrial Engineering (г. Сочи, 2024).

Публикации. В ходе проведения исследований по тематике диссертации опубликовано 20 научных работ. Основные результаты и выводы диссертационной работы изложены в 13 научных публикациях, в том числе в 10 научных работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; в трех научных работах в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных и системе цитирования SCOPUS. Техническая новизна решений подтверждена патентом РФ на изобретение № 2820187 (30.05.2024).

Личный вклад соискателя состоит в написании основных разделов диссертационной работы, планировании и выполнении экспериментальных исследований, совершенствовании существующих методик и конструировании оригинального научно-исследовательского оборудования, обработке и интерпретации полученных данных, внедрении результатов исследований в производство.

Отдельные составляющие теоретических и экспериментальных исследований, а также внедрение результатов диссертационной работы выполнены с соавторами научных работ, представленных в списке публикаций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, приложений. Содержит 198 страниц машинописного текста, 115 рисунков и 30 таблиц. Список литературы включает 130 наименований. Два приложения изложены на шести страницах.

ГЛАВА 1. Современное состояние и перспективы развития технологии получения высокофункциональных бетонов с регулируемыми вибродинамическими показателями

Важной областью применения строительных материалов с целью вибродемпфирования является строительство объектов в сейсмоопасных регионах, где учет мероприятий по эффективному гашению колебаний жизненно необходим. В конструктивном плане это решается установкой элементов-гасителей, которые при землетрясении обеспечивают релаксацию амплитудно-частотных характеристик вынужденных колебаний до допустимых пределов. Базовая часть гасителей обычно изготавливается из металла, а их месторасположение выбирается по критерию степени изолирования надземной части сооружения от фундамента.

При строительстве объектов теплоэнергетики первостепенное значение приобретает долговременная и безаварийная работа энергетических установок, как наиболее технически сложных и дорогостоящих составляющих всего промышленного оборудования. Главная задача сопутствующих мероприятий сводится к смягчению вибрационных нагрузок, сопровождающих работу электрогенерирующих устройств с учетом собственных частот и форм колебаний составляющих их механизмов и агрегатов. В связи с массивностью конструкций открытым остается вопрос целесообразности частичной замены железоуглеродистых сплавов на более доступные виды материалов, например высокофункциональные цементные бетоны.

В аспекте промышленного строительства также трудно обойтись без рассмотрения проблематики создания новых видов бетонов для конструктивных элементов различного технологического оборудования. Известно, что фундамент и несущий каркас технологических агрегатов и станков является важнейшим функциональным компонентом всей системы обработки, обеспечивающим эффективность ее работы за счет сохранения размерной стабильности под воздействием статических, динамических и тепловых нагрузок. Параметр долговременной геометрической стабильности вибронегруженных силовых конструкций (отсутствие деформаций усадки и ползучести) приобретает особое значение для позиционирования элементов в составе прецизионной технологической системы. На начальном этапе выбор наиболее подходящего конструкционного материала производится из существующих типов, а при отсутствии таковых – путем разработки

и оптимизации составов по показателям физико-механических свойств (плотность, модуль упругости, предел прочности, показатель жесткости, демпфирующая и теплопроводящая способность, тепловое расширение и т.д.).

В связи с общемировой тенденцией по переходу к низкоуглеродной экономике в России с 2021 года вступил в силу федеральный закон № 296 «Об ограничении выбросов парниковых газов» для регулируемых организаций, который обязывает вести соответствующую отчетность для обращения углеродных единиц. Это выводит фактор углеродной эффективности в разряд важнейших показателей, определяющих выбор материала для массивных промышленных конструкций [5–7]. При расчете его величины суммируют общие энергозатраты на добычу, получение и обработку (рисунок 1) [8].

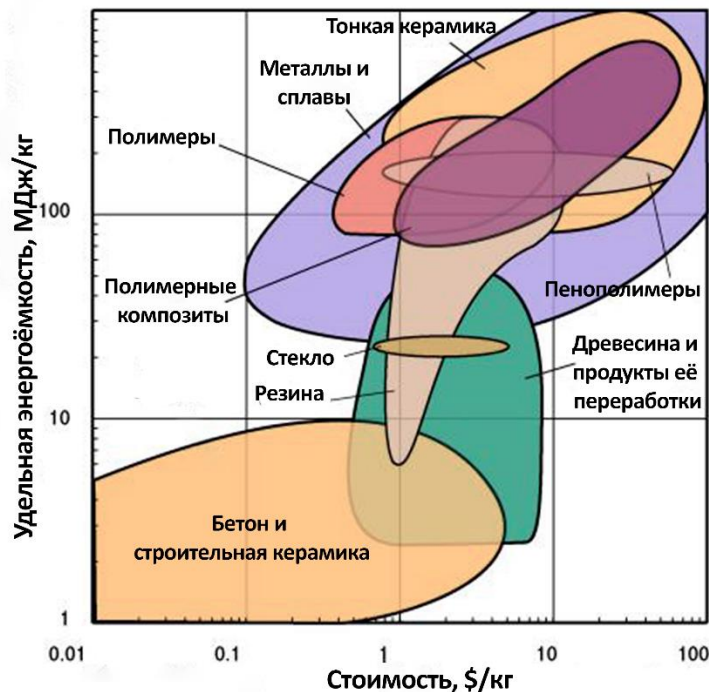


Рисунок 1 – Стоимость и удельная энергоёмкость процессов получения материалов [5]

Анализ данных на рисунке 1 показывает, что по стоимости и энергозатратности цементные бетоны превосходят большинство распространенных промышленных материалов. Это подчеркивает актуальность проведения исследований по переходу к технологиям изготовления промышленных конструкций и элементов оборудования, предусматривающим применение ВФСУБ.

Системный подход к проектированию предполагает структурную оптимизацию конструкций с размещением материала в заданном месте и форме, исходя из принципа минимальной достаточности. Обстоятельный обзор современного состояния и перспектив использования различных типов конструктивных материалов для изготовления эле-

ментов силового каркаса промышленного оборудования приведен в публикациях ряда зарубежных исследователей [9].

Обоснование критериев выбора материалов, свойства которых наиболее полно отвечают комплексу предъявляемых требований, относится к числу наиболее сложных процедур всего цикла проектирования. По частоте использования в вибронагруженных конструкциях современные промышленные материалы можно расположить в ряд (в порядке убывания): сталь, чугун, легкие сплавы, природный камень, полимербетон, керамика, пористые и армированные композитные материалы, в том числе цементные бетоны [9].

1.1 Специфика составов и опыт применения высокофункциональных бетонов в монолитных вибронагруженных конструкциях различного назначения

1.1.1 Строительство уникальных зданий и сооружений

Совершенствование технологии получения ВФБ определяется областью их применения, поэтому при подборе рецептур инновационных бетонных смесей учитывают специфику работы материала в проектируемых конструкциях. Начиная с 2000 года, в странах ЕС разработаны и введены в действие нормативные требования по проектированию составов и правилам применения высокопрочных бетонов, имеющих класс прочности В100 [10].

Составы ВФБ отличает многокомпонентность, обеспечиваемая замещением части объема традиционного крупного заполнителя тонкодисперсными минеральными порошками (микрокремнезем, зола-унос каменного угля, метакраин, нанокремнезем (кремневая кислота) и каменная мука (кварцевая, известняковая). В реакционно-порошковых видах ВФБ объемное содержание минеральных порошков превышает 40–45 %. В качестве мелкого и крупного заполнителя применяют многофракционный кварцевый песок и щебень из базальта, габбро или гранита. Введение комплексных пластифицирующих добавок на основе эфиров поликарбоксилата, обладающих бинарным (стерическим и электростатическим) разжижающим эффектом, в сочетании с микрокремнеземом, размер частиц которого обеспечивает эффективное заполнение простран-

ства на микрометрическом уровне, позволяет получить литевые сверхпрочные цементные матрицы из минеральных смесей повышенной седиментационной устойчивости.

Химическая составляющая механизма формирования дополнительной прочности заключается в трансформации кристаллов портландита в геометрически более развитые гидросиликаты кальция за счет протекания пуццолановой реакции. Сокращение объема капиллярных пор резко уменьшает скорость диффузии агрессивных веществ из окружающей среды, что позитивно сказывается на химической стойкости и долговечности ВФБ.

По вопросу трещиностойкости ВФБ существуют различные точки зрения. Преобладающая заключается в том, что при возникновении перегруженных зон гомогенная структура материала облегчает распространение силовых трещин по всей конструкции. Уменьшение объемной доли крупного заполнителя и повышенный расход цемента объективно снижают трещиностойкость за счет склонности бетона к усадочным и термическим деформациям. Суммируя приведенные факторы, можно сделать вывод об изменении характера разрушения ВФБ в сторону повышения хрупкости в сравнении с традиционными бетонами [11]. В случае необходимости повышения стойкости к циклическим нагрузкам стандартное решение заключается в дисперсном армировании структуры путем введения микрофибры различной природы и геометрии. При совмещении рациональных составов и технологии производства возможно получение сверхпрочного дисперсно-армированного бетона с прочностью на сжатие не менее 150 МПа. В работах [12 – 17] рассмотрены составы и деформативные свойства инновационных видов бетона, выявлены механизмы формирования свойств, показывающие возможность уменьшения армирования за счет использования высокопрочных видов бетона. До настоящего времени основными областями применения высокопрочных бетонов в гражданском строительстве являлись [18] силовые конструкции для высотного строительства, напольные покрытия и элементы фасада.

1.1.2 Промышленное и транспортное строительство

При соответствующем технико-экономическом обосновании высокопрочное минеральное литье на основе ВФСБ имеет потенциал применения в сферах промышленного и транспортного строительства, где присутствуют значительные динамические нагруз-

ки. Примерами таких конструкций являются опорные рамы и башни ветрогенераторов, несущие каркасы и стволы жесткости промышленных объектов, большепролетные перекрытия цехов, тубинги туннелей и несущие опоры мостов, резервуары, защитные конструкции и др. Конкурентоспособность цементного литья обусловлена высокими прочностными, динамическими и технологическими показателями.

В рамках рассмотрения опыта применения ВФБ на объектах промышленного строительства с целью выработки пороговых требований для вновь разрабатываемых составов целесообразно отталкиваться от значений показателей свойств материалов, используемых при проектировании оснований и силовых конструкций современных видов обрабатывающего оборудования, к которым предъявляют повышенные требования по демпфированию и сохранению геометрической стабильности.

По степени влияния вибродинамических характеристик материалов несущих конструкций на качество реализуемого технологического процесса выделяется группа высокоскоростных агрегатов и станков. Анализ ретроспективы применения цементных бетонов в качестве материала для производства промышленного оборудования и станков показывает, что первые прототипы токарных станков с железобетонной станиной были созданы в Англии и США на рубеже XIX–XX веков. Относительно невысокие показатели механических свойств минерального литья, ограниченные уровнем развития науки о бетонах в указанный период, препятствовали распространению таких технологий. Определенный импульс на свое продвижение в нетрадиционных областях промышленности (машино- и станкостроение, судостроение) бетоны получили в 1914–1918 гг. по причине дефицита железоуглеродистых сплавов. В 1915 году Л. Йоменс (США) впервые разработал технологию изготовления станков с железобетонной станиной, которые использовались для производства артиллерийских снарядов [19]. В 1917 году Г. Шлезингер поменял направляющие токарного станка с чугунных на бетонные, которые, как показала практика, оказались не вполне адекватной заменой по причине ускоренного износа поверхностей скольжения [20].

В 1944 году компания Boehringer изготовила цельнобетонную станину металлообрабатывающего станка. До этого нижняя цементная часть всегда сочеталась с верхними чугунными компонентами, поэтому бетон не оказывал значимого влияния на точность обрабатывающей системы. Учитывая положительный опыт, в 1988 году разработчик Sugishita (Япония) представил обрабатывающий центр с бетонным основанием и колон-

ной в сочетании с чугунными пластинами [21]. Опыт эксплуатации показал улучшение показателей демпфирования системы, при этом статическая жесткость комбинированной конструкции была сопоставима с показателями цельнометаллического аналога.

Исходя из усредненных значений температуропроводности, характерных для металлических и неметаллических материалов, бетонные отливки отличается повышенная тепловая инерция. На этапах заливки бетонной смеси и последующего твердения экзотермия цемента и пониженная (в сравнении с чугуном) теплопроводность вызывают опасность формирования значительных термических напряжений и деформаций. Для выравнивания температурного градиента при бетонировании массивных элементов закладывают специальные трубки, охлаждают компоненты смеси и проводят мероприятия, способствующие эффективному рассеиванию тепла с поверхности. Собственные деформации бетона снижают путём оптимизации состава, введения добавок-компенсаторов усадки, повышенного армирования структуры, уплотнения исходной смеси и правильного ухода при твердении. При соблюдении технологии бетонные элементы сохраняют свои исходные размерно-геометрические параметры в процессе долговременной эксплуатации. Согласно опубликованным данным железобетонная станина, хранившаяся восемь лет на открытом воздухе, не имела отклонений от первоначальных размеров [1].

Технологические решения, найденные за последнее время, позволили создать бетоны сверхвысокой прочности ($R_{сж}=120\text{--}150$ МПа). Имеются положительные примеры их применения в несущих каркасах промышленного оборудования без армирования или упрочняющей металлической обоймы [22], а также при изготовлении штампов для гидроформования листового металла [23].

Компания Kle-Rause (КНР) в 2018 году построила завод по производству опорных элементов станков и промышленного оборудования, отливаемых из высокопрочного бетона. Основные компоненты, входящие в рецептуры литевых смесей, импортируются из ЕС. Анализ открытых источников показывает, что наиболее апробированным на практике является цементный композит Nanodur Compound (Германия), из которого отливают массивные вибронагруженные конструкции в различных сферах промышленного строительства [24].

В нашей стране проблематику проектирования и изготовления железобетонных деталей промышленного оборудования разрабатывали, начиная с середины XX века. В

1941 году на Коломенском станкостроительном заводе был собран протяжной станок с железобетонной станиной. Несколько позднее на Курганском станкостроительном заводе создали и успешно испытали токарные станки с железобетонной станиной, предназначенные для точения турбинных колёс [1].

Анализ опубликованных работ показывает, что существует два главных направления применения бетонов в конструкциях промышленного оборудования. Первое основано на заполнении полых сварных конструкций с целью улучшения показателей структурного демпфирования и жесткости несущего каркаса [19]. В 1982 году В. Дж. Уилс-Морен на предприятии по разработке прецизионного станочного оборудования в Кренфилде (Англия) [25] изготовил основание высокоточного станка для алмазного точения с применением сварных стальных оболочек, заполненных синтетическим гранитом. Чугунные направляющие крепились к основной конструкции при помощи эпоксидного клея. Аналогичное техническое решение успешно повторено при изготовлении большого зеркально-шлифовального станка в 1989 году.

Второе направление представляется более перспективным и предусматривает применение высокопрочного цементного литья для изготовления цельнобетонных элементов в составе промышленного оборудования. В этом случае по технологии, применяемой в промышленном строительстве, производится формовка элементов с установкой всех закладных деталей, необходимых для последующей сборки агрегата. Достигаемая цель заключается в максимальном снижении металлоёмкости изделий и трудозатрат на изготовление форм (используются многооборотные формы), а металл расходуется только на изготовление закладных деталей и арматурных каркасов. Дополнительное преимущество такого технологического подхода – возможность относительно быстрой реализации на свободных мощностях заводов стройиндустрии. В этом случае базовые детали формуется на предприятиях ЖБИ, а затем доставляются на машиностроительные заводы для окончательной обработки и сборки. Из бетонного литья можно изготавливать массивные цельнолитые конструкции, составные части гибридных конструкций, а также полые конструкции со встроенными стойками, стальными направляющими или пластинами, системами охлаждения, сервисными трубами, кабельными каналами и т.д. [26].

Дополнительные возможности в развитии второго направления связаны с совершенствованием технологии получения сталефибробетонов – конструкционных материалов на высокопрочной цементной матрице, дисперсно-армированной стальными волок-

нами. В работе [27] автором разработан сталефибробетон, пропитанный полимером. С помощью численного эксперимента М. Рахман проанализировал поведение разработанного им материала в различных режимах эксплуатации. Было установлено, что полимерная пропитка сталефибробетона обеспечивает превышение его динамической стабильности над чугуном, а конструкционные показатели (модуль потерь при изгибе, первый резонанс, коэффициент демпфирования) достигают максимальных значений при 2%-м объемном содержании армирующего наполнителя. В рамках дальнейшего развития своих исследований Рахман представил каретку из ячеистого бетона, предварительно пропитанного полимером, для профильных рельсовых направляющих [28]. Эксперименты показали, что в границах частотного диапазона до 650 Гц ячеистый бетон, модифицированный таким образом, характеризуется повышенной прочностью, модулем упругости и демпфирующей способностью.

Суммируя вышеизложенное, можно сделать предварительный вывод о том, что дисперсное армирование дает возможность существенного повышения прочности сечений сжатых, растянутых и изгибаемых элементов конструкций, увеличивая при этом их трещиностойкость и вибростойкость. В свою очередь применение гетерогенных материалов из сильно различающихся по природе компонентов (ячеистый бетон и полимерная матрица) улучшает демпфирующую способность конструкций.

Повсеместное применение железоуглеродистых сплавов в конструкциях и узлах вибронгруженного промышленного оборудования вызывает необходимость учета диапазонов их термического расширения при проектировании составов минерального литья. В этом случае ВФСЧБ могут стать основой долговечных гибридных конструкций, не испытывающих значимые термические напряжения при эксплуатации. Вопросы демпфирования термических напряжений в металлокомпозитных конструкциях исследовал профессор К. Доу [29]. Оригинальный поход к решению проблемы компенсации тепловых деформаций, возникающих в гибридных конструкциях оснований и базовых частей оборудования, предложил Р. Нойгебауэр. Он заключается в послойной укладке материалов с различным тепловым расширением при заливке конструкции [30].

Начало периода промышленного использования ВФБ в транспортном строительстве датируется концом XX века. Одним из наиболее впечатляющих примеров его применения является строительство самого высотного в мире (на 2004 г.) вантового транспортного моста Мийо (Франция): из него отлили пилоны высотой 341 м. Ряд уникаль-

ных сооружений, построенных с применением высокопрочных бетонов на основе микрокремнезёма, включает комплекс высотных зданий в Чикаго, тоннель под Ла-Маншем, мост через пролив Нортумберленд (Канада), морские буровые платформы в Северном море и др.

В России также имеется опыт использования самоуплотняющейся разновидности ВФБ (ВФСУБ). Из такого бетона возвели ростверк пилона моста через пролив Босфор Восточный (г. Владивосток), создана уникальная морская ледостойкая стационарная нефтяная платформа «Приразломная» (балластировочный слой, опоясывающий конструкцию по периметру) [31].

За последние десятилетия в Москве с помощью ВФБ возведены и реконструированы: торгово-рекреационный комплекс «Охотный ряд», постамент памятника «Петру I», железнодорожный мост по ул. Шереметьевская, здание «Смоленский Пассаж», транспортные тоннели и пешеходные переходы на Кутузовском и Ленинском проспектах, шумозащитные стенки и путепроводы на МКАД, дюкер коллектора Люберецкой станции аэрации, денежное хранилище «СДМ Банка», торговый центр на Курском вокзале, стилобатная часть здания «Реформы», подземный комплекс «Парк-Сити», транспортные тоннели и развязки третьего транспортного кольца, коллекторы для инженерных коммуникаций (ул. Народная, ул. Б. Дмитровка, Карамышевская наб.), бассейны на ул. Бакулева и Привольная, Московский зоопарк, комплекс высотных жилых зданий «Кунцево» и др. [32].

Анализ данных практической реализации показал, что основные преимущества технологии с применением ВФСУБ заключаются в снижении трудовых затрат и сокращении сроков строительства. В России использование бетонов последнего поколения ограничено целым рядом факторов: отсутствуют исследования по требованиям к качеству компонентов бетонной смеси, долговечности и надежности конструкций с учетом динамических нагрузок. В рамках преодоления существующих трудностей ОАО ЦНИИС в 2010 году разработал документ по самоуплотняющимся бетонным смесям для бетонов мостовых и тоннельных конструкций классов В30–В50, приготовленных с использованием добавок на основе эфиров поликарбоксилатов.

Анализ литературных данных позволил определить характерные недостатки, проистекающие из особенностей рецептур составов ВФБ, на которые необходимо обращать особое внимание при проектировании ВФСУБ.

Так, эффект упрочнения и самоуплотнения достигается за счет снижения контактных взаимодействий между зернами крупного и мелкого заполнителя, что обеспечивается высоким объемным содержанием цементного теста. Повышенный удельный расход цемента увеличивает опасность возникновения дефектов структуры по причине роста деформаций усадки и ползучести, а также неравномерного тепловыделения при твердении. Применительно к вибронагруженным конструкциям остаются открытыми вопросы по трещиностойкости и хрупкому характеру разрушения ВФБ из-за замены части объема крупного и мелкого заполнителя на микро- и нанометрические компоненты. Несмотря на повышенную плотность микроструктуры, а значит низкую проницаемость для внешних агрессивных газообразных и жидких сред, рабочие поверхности бетона, применяемого в промышленном строительстве и машиностроении, усиливают коррозионностойкими эпоксидными составами, в том числе от воздействия СОЖ.

Металлические сплавы, природный камень и полимербетоны формируют обязательный перечень материалов, рассматриваемых при проектировании вибронагруженных силовых конструкций. В этой связи показатели их свойств необходимо учитывать при назначении главных критериев оптимизации в рамках разработки конкурирующих аналогов из ВФСБ.

До середины 30-х годов XIX века силовые конструкции, эксплуатируемые в сфере промышленного строительства и воспринимающие знакопеременные нагрузки, изготавливались из дерева или цветных сплавов. После внедрения доменного процесса железные сплавы, обладая уникальным соотношением механических и технологических показателей, уже на протяжении многих десятилетий определяют облик объектов промышленного, транспортного и специального строительства. Высокие механические показатели современных металлов иллюстрируют данные, приведенные в таблице 1.

Процесс изготовления стальных и чугуновых элементов отличает ряд существенных недостатков. Так, литье черных металлов требует наличия дорогостоящих и трудоемких в изготовлении модельных комплектов, что экономически оправдано при условии массового производства. Сварные конструкции более технологичны: они быстро и надежно соединяются в результате местного расплавления металла в монтажных швах. Однако, высокая температура сварки, превышающая температуру плавления металла, вызывает активацию негативных процессов, ухудшающих структурно-зависимые свойства металла.

Таблица 1 – Механические свойства стали [33]

Сплав	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	Применение
Нелегированная низкоуглеродистая сталь				
C10E	640-780	≥ 390	≥ 13	листовой металл, конструкционная сталь
C20D	380	205	25	
Высокопрочная низколегированная сталь				
S420NL	500-680	320–420	≥ 19	конструкции для низких температур, рамы машин
S500N	560-740	≥ 400	16	
Закаленная и отпущенная нелегированная сталь				
C40	≥ 580	≥ 320	≥ 16	коленчатые валы, болты, зубила, молоты, лезвия
G10800 (UNS)	800-1310	480–980	24–13	
C100S	1470-1670	≥ 1275	≥ 6	
Закаленная и отпущенная низколегированная сталь				
G40630 (UNS)	786-2380	710–1770	24–4	пружины, инструменты, подшипники, втулки, валы, поршни, шестерни
30CrNiMo8	1250-1450	≥ 1050	≥ 9	
51CrV4	1100-1300	≥ 900	≥ 9	
Аустенитная нержавеющая сталь				
X2CrNiMo18-14-13	500-700	≥ 200	≥ 40	сварные конструкции

В свою очередь при монтаже сборных стальных элементов на болтовых соединениях жесткость конструкции и характеристики демпфирования существенно зависят от чистоты поверхностей и усилий затягивания.

В сравнении со сталью чугун характеризуется улучшенными характеристиками демпфирования, из него проще изготавливать детали сложной геометрической формы и цельнолитые конструкции (башмаки колонн, люки, ограждения, трубы канализации, фундаменты и станины под технологическое оборудование).

Таким образом, преимущество черных сплавов складывается из высоких прочностных и деформативных показателей, технологичности изготовления, наличия опыта эксплуатации, а также апробированных методик расчета конструкций. В качестве недостатков можно выделить массивность, энергоемкость, воздействие на экологию и

небезопасность для работников. Поэтому в настоящее время активно исследуется вопрос возможности применения неметаллических материалов, не предусматривающих высокотемпературные технологические переделы при формовании или сборке вибронагруженных конструкций.

Природный камень применяют для изготовления фундаментов и опорных конструкций высокоточных промышленных машин с улучшенными виброгасящими, диэлектрическими и коррозионностойкими показателями [34]. Как правило, в этом качестве выбирают средне- и мелкозернистый гранит, характеризующийся доступностью и подходящими физико-механическими свойствами. Технические характеристики натурального камня, применяемого в конструкциях промышленного оборудования, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели свойств натурального камня (гранит) [9]

Свойство	Impala (ЮАР)	Black Galaxy (Индия)	Ji Nan Black (КНР)	Tarn (Франция)
ρ_m , кг/м ³	2900	2900	3000	2900
$R_{сж}$, МПа	300	190	250	180
$R_{изг}$, МПа	20	19	26	24
E, ГПа	90	44	70	46
α_t , °C ⁻¹ (10 ⁻⁶)	6.5	6.0	5.0	6.0

Особенность конструкций из натурального камня состоит в упругой работе до момента достижения пороговых механических нагрузок. Это повышает точность результатов проектирования с использованием методов инженерно-математического моделирования, основанных на численном решении дифференциальных уравнений (метод конечных элементов).

Как показывает практика гранитные конструкции обеспечивают эффективное демпфирование вибрационных колебаний, сопровождающих технологические процессы, а сочетание низкой теплопроводности и теплового расширения уменьшает внутренние напряжения, возникающие от температурных импульсов, обеспечивая долговременную стабильность работы.

Перечень природных материалов для изготовления конструкций промышленного оборудования будет неполным без технологии каменного литья, имеющей ряд преимуществ. Каменное литье получают при температурах 1300–1600 °C из минеральных расплавов магматических (диабазы, габбро, базальты, андезитобазальты) и метаморфиче-

ских (амфиболиты, сланцы и др.) пород [35]. Посредством петрургии выпускают изделия с уникальным набором показателей свойств (таблица 3), которые в целом ряде практических приложений могут выступать в качестве альтернативы более дорогим и дефицитным металлическим сплавам.

Таблица 3 – Показатели свойств каменного литья

Показатель	Тип каменного литья	
	износостойкое	термостойкое
Плотность, кг/м ³	2900–3000	2800–2900
Прочность, МПа:		
- на сжатие	250–500	100–260
- на изгиб	30–50	10–30
Модуль упругости, ГПа	100,6	43,7
Теплопроводность, Вт/(м·°C)	1,52	1,07
Теплоёмкость, кДж/(кг·°C)	0,77	0,67
Термическое расширение, °C ⁻¹ (10 ⁻⁶)	83,0	60,0
Водопоглощение (масс.), %	0,13	0,70

На основе базальтового и диабазового каменного литья в РФ и странах ЕС промышленно выпускают строительные материалы и изделия, предназначенные для защиты оборудования от абразивного износа и химической коррозии, а также трубы, черепицу, плиты для полов и облицовки стен зданий, фасонные изделия в виде деталей гидроциклонов и деталей желобов, шары и кирпичи для футеровки шаровых мельниц. Для формирования равновесной скрытокристаллической микроструктуры, изделия отжигают, медленно охлаждая в температурном диапазоне 800–200 °C. Высокие температуры и необходимость дополнительной термической выдержки обуславливают высокую энергоёмкость производства изделий из каменного литья, сравнимую с аналогичным показателем чугуна и стали, что сдерживает распространение петрургии.

Полимербетоны. Полимерные композиционные материалы с вяжущими на основе реакционных синтетических смол используют для изготовления вибронагруженных силовых конструкций (рам, колонн, опор, станин), начиная с 70-х годов XX века. По состоянию на текущий момент промышленно развитые страны реализуют крупные национальные инвестиционные программы, направленные на создание новых видов композиционных материалов для объектов промышленного строительства, с упором на обеспе-

чение потребностей машино- и станкостроения. С начала 2000-х годов в Германии профинансированы такие исследования на общую сумму свыше 1,2 млрд. долларов. Это способствовало появлению большого разнообразия специализированных литевых полимерных композитов: BasaldurVC; Baerlit; Duropol; Hydropol и др.

Основными видами синтетических вяжущих в составах полимербетонов являются смолы (эпоксидная, фурановая, полиэфирная), а наполнителями – тонкодисперсные порошки мрамора, кварца, перлита, стекла, доломита, гидроксида алюминия, карбида кремния, железа и др. [36]. Для армирования используют углеродные, целлюлозные, стеклянные и арамидные волокна. Большое значение имеет тип отвердителя, длительность отверждения и эффективность рассеивания тепла, выделяемого в результате протекания экзотермических реакций, обеспечивающих создание равновесной структуры готового композита. Процессами формирования физико-механических показателей полимербетона управляют посредством вариации вида наполнителя и смолы, а также степени наполнения. Это позволяет достичь максимального соответствия свойств материалов особенностям их работы в проектируемых конструкциях. Процесс литья полимерных смесей осуществляют при температурах $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ в формах из стеклопластика, дерева или силикона, усиленных металлическим каркасом. Отсутствие высокотемпературных технологических операций снижает энергоемкость производства на 20–40 % в сравнении с железоуглеродистыми сплавами. Помимо высокого модуля упругости, демпфирования и стабильности свойств, к достоинствам высоконаполненных полимербетонов относятся низкие показатели теплового расширения, остаточных напряжений и усадки.

Оптимальное сочетание вида наполнителя и гранулометрического состава обеспечивает получение композитов с максимальной степенью наполнения полимера (до 90–93 % масс.), что соответствует порогу перколяции [37]. Расчетные значения оптимального распределения зерен по их размерам могут быть найдены по кривым максимальной плотности минерального каркаса (коэффициентам сбега), разработанным в методиках проектирования дорожных полимерных материалов. Для уменьшения конечной пористости материала производят деаэрацию отливаемой смеси путем колебательного перемещения формы, практикуют также незначительный прогрев заливаемой смеси до 45–50 °C. В случае предельно наполненных композитов формование деталей производят способом прессования под давлением 20–40 МПа [38].

Предельно наполненные составы характеризуются пониженными (в 20–50 раз) показателями термического расширения и теплопроводности, но увеличенной удельной теплоемкостью. Из-за этого температуропроводность полимербетона – важнейший показатель, влияющий на формирование неоднородного теплового поля при нестационарном характере процессов теплообмена, приобретает экстремально низкие в сравнении с металлами значения. Это приводит к тому, что в случае возникновения активных экзотермических процессов структурообразования или под воздействием меняющихся внешних факторов в полимербетонных элементах конструкций возникают опасные термические напряжения. Во избежание недопустимых деформаций и для создания термически стабильных рам при их формовании в структуру часто интегрируют контуры охлаждения [36].

Группой учёных исследовалось влияние наполнителей и заполнителей (базальт, сподумен, зола-унос, речной гравий, песок и мел) на свойства полимербетонов. На основании полученных результатов они пришли к выводу, что оптимальный состав включает 13 % смолы и 87 % минерального наполнителя (базальт, песок и зола-унос) [39]. В. Локке [40] разработал полимербетон на основе винилэфира ($R_{сж}=100$ МПа, $R_p=15$ МПа).

Существуют многочисленные примеры успешного применения полимербетонов в разнообразных промышленных технологиях. Известная швейцарская фирма Фриц Штудер АГ создала полимерный композит – синтетический гранит Granitans, предназначенный для отливки силовых конструкций и деталей промышленного оборудования. Его состав включает гранитный наполнитель и эпоксидную смолу [41]. Благодаря своим демпфирующим свойствам синтетический гранит марки Granitans100 был выбран в качестве материала-основы для станины крупногабаритного высокоточного алмазного токарного станка [25]. По данным разработчика внедрение нового полимербетона в производство позволило обеспечить производителю высокую конкурентоспособность станков, а также увеличить до 30 % прибыль за счет производства деталей из Granitans100 для сторонних заказчиков.

Как показывает зарубежный опыт на пути практического внедрения технологий полимербетонов для базовых деталей и элементов силового каркаса лежит целый ряд сложных и взаимосвязанных технико-экономических задач. Немецкой компании Carl Zeiss, специализирующейся в области оптики, потребовалось более 10 лет на доведение

до уровня эффективно работающего оборудования прототипа измерительной машины со станиной и стойкой в виде пятитонного блока из монолитного полимербетона.

В 1980 году была основана компания RAMPF Composite Solutions (Берлингтон, Канада), профилирующаяся на полимерных композитах для промышленного сектора, включая производство технических производственных систем для точного, динамического позиционирования и автоматизации. В состав композиций, выпускаемых RAMPF Group, входят полиуретановые и эпоксидные смолы, а также наполнители из природного камня (таблица 4) [9].

Таблица 4 – Показатели свойств промышленных композитов

Показатель	GG25 IRON/ чугун	EPUMENT MINERAL CASTING/ эпоксидная смола	EPUDUR UHPC /ВФБ	EPUSTONE HARD STONE/ природный камень
ρ_m , г/см ³	7,15	2,40	2,50	2,90
$R_{сж}$, МПа	840	130	125	250
$R_{изг}$, МПа	240	30	14	20
E, ГПа	120	40	45	65
α_t ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	9	15	10	6.5
δ	0,0045	0,0340	0,0265	0,0150

В нашей стране примером использования полимербетон в машиностроении является высоконаполненный композиционный материал – синтегран. Его изготавливают на основе эпоксидной смолы ЭД-20, наполненной высокомодульным заполнителем из магматических пород с фракционным составом от 0,6 до 20 мм и кварцевого наполнителя с размером частиц до 60 мкм, при этом используется ряд органических модификаторов [42].

Профессор Ю.В. Кирилин (УлГТУ) в своей работе [43] показал перспективность замены станины и стойки фрезерного станка с чугуна на синтегран. Принятое решение позволило увеличить виброустойчивость конструкции в два раза, при одновременном снижении металлоемкости на 70 %. Важнейшие эксплуатационные свойства полимербетон зависят от термоустойчивости эпоксидного связующего. В результате интенсивных исследований, проведенных в течение нескольких последних лет, удалось повысить предел текучести эпоксидного связующего в 1,5 раза, а термостойкость довести до 100 °С.

Показатели свойств минерально-полимерных композитов (МПК), природного камня и чугуна существенно отличаются. Однако, как и в случае любого конструкционного материала, их пригодность корректно оценивать с учетом специфики работы проектируемого промышленного оборудования.

Практическая целесообразность производства деталей из полимерных бетонов обусловлена снижением трудоемкости, экономией энергетических ресурсов, сокращением производственных площадей и вредных выбросов. Однако есть и дополнительные затраты, связанные с изготовлением закладных металлических деталей, высокой стоимостью синтетических смол. В итоге их главным преимуществом по сравнению с чугуном является отсутствие высокотемпературных процессов формовки и повышение технического уровня технологического оборудования за счет вибродемпфирующих показателей, коррозионной стойкости и снижения общей массы.

1.2 Критерии оптимизации высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов для объектов промышленного строительства

Анализ зарубежных и отечественных источников научно-технической информации позволил составить перечень преимуществ в случае замены металлических сплавов на ВФБ в рамках рассматриваемой проблематики [1, 5, 9, 44 – 46]:

- многократное (4–6 раз) повышение вибродемпфирующих показателей по скорости затухания вибраций;
- повышение статической и динамической жесткости, обеспечивающее снижение пиков виброскорости колебаний и амплитуды относительных колебаний технологической системы;
- рост мощности агрегатов и механизмов, улучшение качества обработки и замедление износа;
- сужение диапазона опасных резонансных частот;
- термическая инерционность, сглаживающая импульсы температурного воздействия;
- температурная и размерная стабильность деталей за счет снижения общей величины собственных деформаций отливок относительно чугунных;

- снижение трудоёмкости изготовления и повышение коэффициента использования материала в связи с меньшими величинами припуска на обработку;
- сокращение цикла производства и ускорение оборачиваемости средств предприятия.

За рубежом разработаны и с успехом используются ВФБ, специализированные для применения в промышленном строительстве, включая технологическое оборудование и обрабатывающие станки. Требования к количественным показателям свойств таких бетонов, приведенные в информационных материалах фирм-производителей, обобщены в таблице 5 [24, 47, 48].

Таблица 5 – Требования к количественным показателям конструкционных материалов

Свойства	Металлы		Бетоны		Эпоксидные композиты			
	Сталь	Чугун	МПК	ВФБ	Карбоновая фибра HT stiffening	Карбоновая фибра HT stiffening	Арамидная фибра stiffening	Фибра из Е-стекла stiffening
ρ_m , кг/м ³	7850	7200	2300–2500	2200–2500	1600	1600	1400	2000
μ	0,3	0,2–0,3	0.25–0.3	0,2–0,3	-	-	-	-
Е, ГПа	210	70–100	30–44	50–60	144	48	50	40
Прочность, МПа	400–1600	150–400	10–40	8–10	2400	800	200	1100
сжатие	250–1200	700–1200	140–160	100–200	-	-	-	-
изгиб	150–600	100–300	15–50	3–8	-	-	-	-
δ	0,002	0,003	0,02–0,03	0,02–0,03	-	-	-	-
α_t (10 ⁻⁶ /°C)	11–18	10	9–18	10,6	0	0,5	3,5	5
λ , Вт/(м·°C)	47	50	1–3	1,7	10	1	0,1	0,6
C_m , кДж/(кг·°C)	0,49	0,45	0,7–1,3	0,9	1	1	1,5	1,1

Данные таблицы 5 позволяют сформировать диапазон технико-экономических показателей, отражающий современный уровень развития техники и технологии в области производства материалов, применяемых в промышленном строительстве для восприятия и демпфирования вибрационных нагрузок, генерируемых при работе обрабатывающего оборудования или отдельных технологических агрегатов (таблица 6).

Таблица 6 – Показатели промышленных материалов, применяемых в вибронегруженных конструкциях

Материал	$R_{сж}$, МПа	R_p , МПа	$E_{ст}$, ГПа	ρ , т/м ³	δ	Стоимость, тыс. руб/т
Металлы						
1.Чугун	550	170	115	7–7,8	0,0045	30
2. Сталь	500	500	210	7,7–8,2		50,5
3.Алюминиевые сплавы	200	200	70	2,6–2,9		140
4. Гранит	230	10	49	2,34–2,78	0,0150	10
Полимерные бетоны						
5. Синтегран	120	27	27	2,4	0,033	150
6. EPUMENT MINERAL CASTING	130	30	40	2,4	0,034	
Цементные бетоны (существующие)						
7. NANODUR Compound 5941	125–130	15	46,5	2,45	0,0260	нд
8.EPUDUR UHPC CONCRETE	125	14	45	2,5	0,0265	нд
Цементные бетоны (проектируемые)						
9. ВФСУБ (проектируемый)	120	10	50	2,4–2,5	0,026–0,0265	10

Данные таблицы 6 позволили уточнить критерии оптимизации и количественные показатели основанных свойств ВФБ, определяющие их конкурентоспособность и практическую значимость (№ 9 в таблице 6). Из приведенных данных следует, что по уровню эксплуатационных характеристик проектируемые ВФСУБ сравнимы с природным гранитом, превосходят полимербетоны по жесткости, имея оптимальные стоимостные показатели среди всех групп материалов.

1.3 Вибродинамические свойства материалов с жесткофиксированными структурными связями

Научное обоснование требований к теоретически достижимому уровню вибродинамических характеристик ВФСУБ возможно путем рассмотрения существующих феноменологических подходов, разработанных для материалов с жесткофиксированными структурными связями. Анализ опубликованных в данной области работ позволит осуществить первичную систематизацию разрозненной информации о причинно-следственных связях между структурой, минерально-фазовым составом жёсткого композита и параметрами распространения волн внутренних напряжений, а также их влияния на деструктивные процессы в цементном конгломерате.

1.3.1 Механизмы демпфирования

В результате твердения сырьевых смесей на основе композиционных цементных вяжущих формируется конструкционный материал с малоупругой структурой. При вынужденных колебаниях таких материальных систем большая часть диссипации передаваемой извне энергии происходит в контактных зонах на различных масштабных структурных уровнях. Несмотря на обширные исследования, показатель демпфирования бетонов трудно поддается прогнозной оценке, а решение прикладных задач базируется на опытных данных и эмпирических подходах.

Разнонаправленные по своей природе показатели жесткости и демпфирующей способности конструкций определяют вибродинамику промышленных объектов и эффективность поглощения механических колебаний применяемых материалов [49 – 52]. В статье [53] авторы исследовали процессы высокоскоростной обработки и пришли к выводу, что движущиеся части технологического оборудования предпочтительно изготавливать из относительно легких материалов и конструкций, при этом основание должно быть массивным, обеспечивая демпфирование и устойчивость всей системы. В этой связи очевидна важность решения задач структурной оптимизации технологических систем и отдельного оборудования, включая создание облегченных в сравнении с металлами конструкционных материалов.

Для определения величины потерь вибрационной энергии колеблющихся материалов и конструкций применяют методы математического описания механизма демпфирования.

Применительно к системе с одной степенью свободы уравнение, описывающее деформации под действием внешней вибрационной нагрузки и диссипацию энергии за счет внутреннего трения колебательной системы, имеет вид [54]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x = 0, \quad (1)$$

где ω_n – это собственная частота колебаний конструкций;

ζ – относительный коэффициент демпфирования.

Для учёта демпфирующих свойств конструкций из различных строительных материалов обычно производят построение спектральных кривых с различными коэффициентами демпфирования [55]:

- для конструкций из стали коэффициент демпфирования равен 0,02, если уровень напряжений не превышает 50 % от величины предела текучести;
- для бетона коэффициент демпфирования зависит от уровня напряжений и находится в пределах: 0,02–0,04;
- для резинометаллических опорных частей коэффициент изменяется в широком диапазоне 0,06–0,12.

Динамику снижения амплитуд свободных колебаний оценивают по величине логарифмического декремента затухания δ :

$$\delta = \ln \frac{x(t_i)}{x(t_i+T)}, \quad (2)$$

где T – период;

x – амплитуды однонаправленных последовательных колебаний.

В практическом плане степень демпфирования приобретает особую значимость при приближении вынужденных колебаний к диапазону резонансных частот, близких к собственной частоте конструкции. Игнорирование данного фактора в расчетах приводит к катастрофическим последствиям: Tacoma Narrows Bridge Collapse (1940) – подвесной мост в штате Вашингтон рухнул из-за резонансных колебаний, вызванных ветром; в турбине атомной электростанции в Сан-Онофре (2012) вибрация парогенераторов вызвала их износ и разрушение; в двигателе ракеты «Ariane 5» (1996) произошел программный сбой и вызвал резонансные вибрации, что привело к его разрушению; авария

на Амурском газоперерабатывающем заводе (2021) – вибрация оборудования привела к повреждению трубопроводов и утечке газа; катастрофа на нефтегазодобывающей платформе «Deerwater Horizon» (2010) – вибрация в буровой колонне способствовала разрушению оборудования и последующему взрыву [56].

Альтернативный вариант математического описания процесса демпфирования базируется на гистерезисе между приложенной силой и деформацией. Анализ графиков зависимостей «напряжение-деформация» указывает на запаздывание отклика материальной системы на первичное воздействие. При таком подходе демпфирующие свойства характеризуются уравнением упругой деформации, включающим комплексное соотношение между напряжением и деформацией [57]:

$$\tilde{\sigma} = \tilde{E} \tilde{\varepsilon} = (E' + iE'')\tilde{\varepsilon}. \quad (3)$$

Действительная часть модуля упругости в соотношении (3) называется модулем накопления, а мнимая часть – модулем потерь. Модуль потерь связан с фактором гистерезисных потерь η :

$$\tilde{E} = E(1 + i\eta). \quad (4)$$

Эквивалентным количественным показателем является тангенс угла потерь δ , определяющий фазовый сдвиг между напряжением и деформацией:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{E''}{E'} = \eta. \quad (5)$$

Расчетные модели демпфирования невозможно однозначно связать друг с другом, поскольку гистерезисные потери пропорциональны амплитуде смещений, а вязкое демпфирование – скорости. Поэтому числовые показатели демпфирования материала, рассчитанные по ним, отличаются. Вместе с тем на резонансной частоте приближённо выполняется соотношение:

$$\eta = 2\zeta. \quad (6)$$

Существует несколько общепринятых физических механизмов процессов рассеивания энергии, лежащих в основе феномена демпфирования.

1.3.2 Основные составляющие демпфирования

Внутреннее трение в материалах различной природы реализуется неодинаково. В кристаллических материалах оно обусловлено микропластическими деформациями по

границам кристаллов, в полимерных – преодолением сил молекулярного взаимодействия, в гетерогенных дополнено микроскопическим проскальзыванием в зонах раздела фаз. При деформации материала часть механического воздействия рассеивается за счет преодоления сил внутреннего трения с частичным переходом в тепловую энергию. На практике это приводит к нагреванию демпферов при активной работе.

Многочисленные опытные данные показывают, что потери энергии за период колебаний непрямо зависят от их амплитудно-частотных характеристик. В этой связи более обоснованным представляется описание процесса демпфирования гетерогенного материала в виде феноменологической модели, оперирующей коэффициентом гистерезисных потерь. При этом математическое описание коэффициента потерь основано на комплексных величинах, что подразумевает наличие гармонических колебаний.

Демпфирование бетона как композиционного материала зависит от компонентного состава, структуры на макро-, мезо- и микроуровнях, частоты вибрации, уровня и вида нагружений, а также температуры и других факторов. Коэффициенты гистерезисных потерь в композитах сильно различаются в зависимости от природы материалов, входящих в конкретный состав. В таблице 7 приведены усредненные показатели величин коэффициента гистерезисных потерь η для промышленных материалов и демпферов.

Таблица 7 – Коэффициенты гистерезисных потерь материалов различного назначения [58]

Материал	Величина η
Металлы	
Алюминий	0,00002–0,0004
Сталь	0,0001–0,01
Медь	0,001–0,05
Минеральные строительные материалы	
Стекло	0,0001–0,005
Бетон	0,02–0,05
Железобетон	0,04–0,07
Демпферы	
Резина	0,05–2,00
Резинометаллические демпферы для зданий	Более 0,03

Конструкции часто соединяются различными типами механических креплений. При колебаниях соприкасающиеся поверхности взаимно перемещаются и часть энергии

рассеивается через трение. Если величина силы трения не меняется за период, то диссипация энергии за период слабо зависит от частоты. В этом случае трение аналогично внутренним потерям в структуре гетерогенного материала, вызываемым микроскопическим проскальзыванием между поверхностями в зоне раздела контактирующих фаз.

На практике часто встречается случай, когда относительно небольшой структурный компонент (зерно заполнителя) крепится к большому основанию (матрица I-го уровня), которое не включается в расчетную модель. Под воздействием вибрации в материале возникают упругие волны, рассеивающие энергию и создающие дополнительный эффект демпфирования, называемый «анкерные потери».

Термоупругое демпфирование становится практически значимым в случае высокочастотных колебаний на малых масштабах. Теоретически в процессе обратимой деформации температура материала циклически изменяется, снижаясь при растяжении и увеличиваясь при сжатии. В реальном материале поле напряжений имеет локальные градиенты, что приводит к формированию мозаичного температурного поля. Это вызывает местные перетоки тепла, сопровождающиеся потерей энергии. В этой связи долговременная стабильность вибронгружаемых конструкций во многом определяется величиной возникающих термических деформаций, а значит теплофизическими свойствами используемых материалов. От них напрямую зависит качество технологического процесса, включая точность реализуемых операций и производительность машин [1, 44]. Теплофизические показатели, используемые в расчетах нестационарных тепловых полей, возникающих в термически неоднородных конструкциях, приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Тепловые параметры материалов [9]

Материал	ρ , кг/м ³	c_m , кДж/(кг·°C)	λ , Вт/(м·°C)	α_t (10 ⁻⁶ /°C)
Алюминий	2700	0,896	230	-
Сталь	7850	0,46	50	11,0
Чугун	7900	0,45	50	9,0
Стекло	2700	0,84	0,66	-
Бетон	2300	0,78	0,9	-
МПК	2100	0,85	1,5	15

Коэффициенты потерь и схожие модели демпфирования используют в методологии «черного ящика», если физические механизмы затухания в материале неизвестны в контексте рассматриваемой задачи.

В [25] исследовано расположение ребер, корпусов и стенок конструкции относительно тепловых деформаций промышленного оборудования. Влияние различной толщины стенок на тепловые характеристики конструктивных элементов в портальной конструкции обрабатывающего центра рассмотрено в статье [30]. Применение в базовых деталях полировальной машины чугунов со сверхмалым тепловым расширением позволило решить задачу достижения заданных параметров высокой точности процесса.

1.4 Современные способы исследования вибродемпфирующих свойств

1.4.1 Экспериментальные методы

Современные компьютерные системы анализа (Ansys, Abaqus, Comsol Multiphysics SolidWorks) позволяют моделировать напряженно-деформируемое состояние материала в интересующем сечении конструкции, исходя из его геометрии, а также характера и величин внешних воздействий (статических, динамических, температурных и др.). Точность расчетов зависит от корректности входных данных, что не всегда возможно в случае проектирования нетиповых объектов, работающих в сложных условиях. Поэтому повышение точности экспериментальной оценки вибродемпфирующих показателей является важнейшим этапом исследования долговечности материалов, работающих в условиях воздействия вибрации.

Большое распространение на практике получили методы экспериментального модального анализа динамических параметров конструкций [53, 59 – 61]. На рисунке 2 представлен порядок действий в рамках проведения испытаний образцов материала для динамического анализа.

В работе [61] представлена методика проведения экспериментального модального анализа с целью оценки соответствия параметров промышленных конструкций условиям реализуемого технологического процесса. Показано, что отсутствие четко установленных процедур и условий измерений приводит к тому, что широко применяемые в настоящее время экспериментальные методы обеспечивают приблизительную оценку реального поведения конструкций. Дополнительные сложности возникают вследствие нелинейного поведения материалов в условиях реального циклического нагружения.

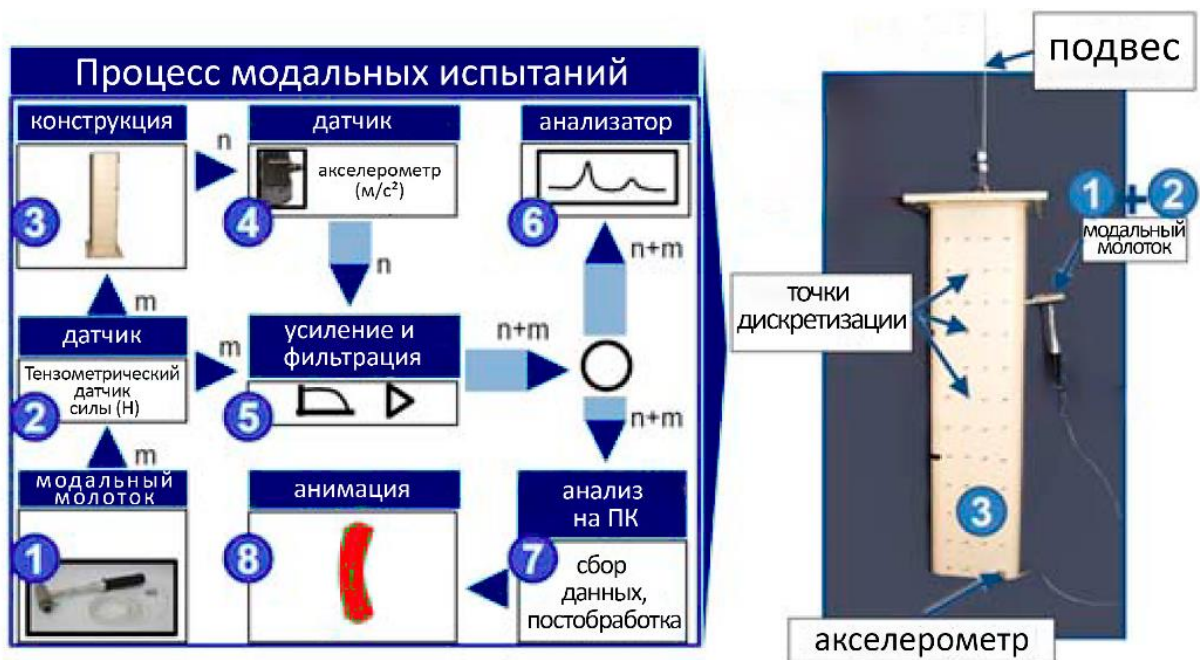


Рисунок 2 – Тестовая установка для динамического анализа (IFT, TU Vienna)

Внедрение модального анализа в сложные и взаимосвязанные строительнотехнологические системы, к которым относится современное промышленное строительство, требует проведения длительных процедур и компетентных экспериментаторов. Желание упростить процесс анализа динамического поведения материалов при воздействии вибрационной нагрузки привело к разработке экспресс-методов, основанных на тензометрии и голографической интерферометрии [62].

Тензометрия, получившая относительно широкое распространение, имеет характерные недостатки, связанные с обоснованием выбора мест наклеивания тензодатчиков, длительностью подготовительных операций и др. В ряде современных работ для получения более полных данных о деформации поверхности конструкций при приложении динамических нагрузок применяют ускоренные методы голографической и цифровой спекл-интерферометрии [63, 64]. Тем не менее до настоящего времени остается ряд экспериментальных трудностей, ограничивающий использование голографических подходов в исследовании материалов.

На промышленных объектах конструкции целесообразно оценивать посредством прямого операционного модального анализа, когда циклическое воздействие генерируется технологическим оборудованием, задействованном в анализируемой строительнотехнологической системе [49, 60]. Данные по локальной средней частоте вибрации технологического оборудования с разбивкой по отдельным видам механообрабатывающего станочного парка приведены в таблице 9 [65].

Таблица 9 – Диапазон частот вибраций, генерируемый различными группами станков

Группа станков	Характерный диапазон основных частот вибраций при работе, Гц	Средняя масса станка, т	Изображение
Токарные	0,2-50	3	
Фрезерные	2-300	1	
Строгальные и долбежные	0,1-15	2	
Протяжные	1-20	6	
Шлифовальные	>20	5	
Сверлильные и расточные	0,2-50	1	

Согласно табличным данным наиболее распространенный диапазон частот, генерируемый технологическими процессами в металлообрабатывающей сфере, составляет 1–300 Гц. Это позволило скорректировать требования к амплитудно-частотной характеристике экспериментального оборудования (стенда), обеспечивающего проведение прямого операционного анализа и исследование вибродемпфирующих свойств материалов, следующим образом:

- прототип технологического оборудования должен осуществлять фрезерную обработку;
- интегрироваться с микроконтроллерами;
- иметь числовое программное управление режимами работы.

1.4.2 Расчетные методы

Современные расчетные методы позволяют смоделировать форму детали или узла, учитывая внешние воздействия, и получить прогнозные данные о работе материала в контрольных точках конструкции. Точность расчетов зависит от корректности постановки задачи, полноты и качества вводимых данных. При численном исследовании процессов демпфирования используют три основные модели.

Первая основана на конечно-элементном подходе. Уравнение движения для решения задачи нахождения вектора приложенных сил f методом конечных элементов имеет вид [57]:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f(t), \quad (7)$$

где M – матрица масс;

C – матрица вязкого демпфирования;

K – матрица жесткости;

u – вектор смещения.

Матрицы масс и жесткости рассчитывают на основе данных о структуре и свойствах материала (плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона и др.). Матрицу демпфирования формируют, учитывая совместный вклад разных механизмов потерь.

Самый простой подход к формированию матрицы демпфирования, реализуется посредством Рэлеевского подхода, предполагающего линейную комбинацию матриц масс и жесткости

$$C = \alpha M + \beta K. \quad (8)$$

Бета-демпфирование более выражено на высоких частотах, а коэффициент α , отражающий влияние массы, описывает потери на низких частотах. Рэлеевская модель демпфирования не принимает в качестве базового конкретный механизм диссипации энергии. При этом β -слагаемое пропорционально скорости деформации и соответствует модели вязкого демпфирования:

$$\eta_b = \beta E_d, \quad \eta_v = \beta G, \quad (9)$$

где K и G – динамический модуль упругости и модуль сдвига соответственно.

Суммируя вышеизложенное применительно к проблематике ВФСУБ можно резюмировать, что прогноз их демпфирующих показателей является сложной задачей. При циклической деформации конструкций энергия поглощается и рассеивается внутри бетона, главным образом, за счет трения от проскальзывания внутренних контактирующих плоскостей. Степень демпфирования материала определяется величиной петли гистерезиса.

зиса на диаграмме «напряжение-относительная деформация», образующейся при колебании бетонных конструкций. Таким образом демпфирование бетона – это частный случай гистерезисного демпфирования, когда площадь, ограниченная петлей, равна диссипации энергии (ΔW) в единице объема материала за один цикл:

$$\Delta W = \pi \omega c X^2. \quad (10)$$

Эмпирически установлено, что для большинства конструкционных материалов, в том числе бетонов, потеря энергии от внутреннего рассеивания за один цикл зависит не от частоты, а от амплитуды [54]. В этом случае уравнение (10) примет вид:

$$\Delta W = \pi h X^2, \quad (11)$$

где h – коэффициент гистерезисного демпфирования ($h = c_{eq} \omega$, где c_{eq} – эквивалентный коэффициент демпфирования).

Влияние материала на демпфирующую способность конструктивной системы здания или технологического оборудования зависит от жесткости и деформативности используемого бетона. Поэтому, наряду с коэффициентами вязкого (c) и гистерезисного демпфирования (h), а также степенью демпфирования ζ , для описания демпфирующих свойств бетонов целесообразно использовать дополнительный параметр η – коэффициент конструкционного демпфирования (фактор потерь). Величина η лежит в диапазоне от $2 \cdot 10^{-5}$ (алюминий) до 2 (твердая резина).

При циклическом нагружении, генерирующем деформации амплитудой X_{max} , бетонный образец за один цикл упругой работы воспринимает (U_{abs}) и рассеивает (U_{diss}) энергию в количестве:

$$U_{abs} = \frac{E X_{max}^2}{2}, \quad (12)$$

$$U_{diss} = \pi E \eta X_{max}^2. \quad (13)$$

Выработка алгоритма корректной оценки влияния рецептурно-технологических факторов на демпфирующие свойства ВФСБ позволит повысить точность расчета в задачах динамического поведения конструкций. Для этого в программы мультифизического моделирования, осуществляющие все этапы построения расчетных моделей материала и конструкций, необходимо вводить в качестве исходных данных фактические характеристики бетонов, полученные в ходе реального эксперимента, а не усредненные значения показателей материалов, погружаемые из библиотек стандартных данных.

Например, среда ANSYS для проведения численного эксперимента показателя демпфирования материалов и конструкций использует матрицу вида [58, 66]:

$$[C] = \alpha[m] + \beta[k] + \sum_{i=1}^{n_{mat}} \beta_i[k_i] + \beta_c[k] + [c_\zeta] + \sum_{k=1}^{n_{el}} [c_k], \quad (14)$$

где α – постоянный множитель к матрице масс;

β – то же к матрице жесткости;

β_i – то же к матрице жесткости, зависящий от материала (в спектральном анализе заменяется на степень демпфирования, зависящую от материала ζ_i);

n_{mat} – число материалов (компонентов структуры) с демпфированием;

β_c – переменный множитель к матрице жесткости (используется для обеспечения постоянства коэффициента демпфирования ζ , вне зависимости от частоты ω);

$[C_\zeta]$ – матрица демпфирования, зависящая от частоты;

$[c_k]$ – матрица демпфирования отдельного k -го элемента (n_{el} – число элементов, имеющих собственную матрицу демпфирования).

Таким образом, уточнение вводимых данных (в уравнении (14) – это $\sum_{i=1}^{n_{mat}} \beta_i[k_i]$) обеспечивает корректность выполнения численных экспериментов по расчету демпфирования гетерогенных материалов и бетонных конструкций на их основе.

1.5 Выработка критериев оптимизации и их иерархизация в рамках поставленной задачи

На основе анализа литературных данных составлена сводная таблица с показателями свойств, которые целесообразно принять в качестве главных критериев оптимизации при подборе составов ВФСУБ с регулируемыми вибродинамическими свойствами. Дополнительно в таблице 10 произведена также расстановка приоритетов в рамках методологии экспертных оценок [5, 9, 50, 67].

Таблица 10 – Прогнозные показатели ВФСУБ для вибронегруженных промышленных конструкций (по результатам систематического обзора)

Параметр	Предполагаемый приоритет	Направление оптимизации	Пороговые значения (сфера станкостроения)
Модуль упругости:			
- статический	9	max	40 ГПа
- динамический	8	max	50–60 ГПа
Деформации усадки	9	min	Усадка менее 0,3 мм/м

Вибростойкость	9	max	Методы оценки разнятся. Необходимо оценивать совместную работу с закладной
Вибродемпфирование	8	max	0,02–0,03
Прочность при сжатии	6	max	70–170 МПа
Прочность при изгибе	7	max	6–15 МПа
Коэффициент Пуассона	4	-	-
Плотность материала	3-7	-	Базовый вариант – тяжелый бетон ($\rho_m=2250\text{--}2450 \text{ кг/м}^3$)
Теплоёмкость	5	-	0,45–1,2 кДж/(кг·°C)
Коэффициент: - теплопроводности - термического расширения	5 8	max min	1–3 Вт/(м·°C) (9–12)·10 ⁻⁶ [°C ⁻¹]
Сохраняемость смеси	7	-	Для обеспечения отсутствия холодных швов схватывание бетонной смеси должно наступать не ранее восьми часов
Удобоукладываемость смеси	9	max	Удобоукладываемость – П5. Диаметр расплыва конуса бетонной смеси – 60–70 см
Стоимость	9	min	80000 руб/м ³

Установлено, что наибольшим приоритетом при разработке составов ВФБ обладают удобоукладываемость, стоимость, динамические и деформативные показатели.

Выводы по главе 1

1. Анализ опубликованных работ указывает на большое разнообразие подходов к разработке научно-технологических основ получения и исследования механизмов демпфирования минеральных материалов с жесткофиксированной структурой. Процедуры проектирования и оптимизации таких материалов определяются спецификой рабо-

ты вибронагруженных конструкций на объекте промышленного строительства и не имеют общепринятых алгоритмов принятия рецептурно-технологических решений.

2. Современная тенденция заключается в увеличении доли использования в промышленных конструкциях, испытывающих знакопеременные нагрузки, конструкционных материалов на основе полимерных композитов, природного камня, керамики и высокопрочных бетонов. Главными факторами, ограничивающими применение инновационных неметаллических материалов, являются повышенная стоимость, дефицитность, отсутствие опыта проектирования составов и эксплуатации таких конструкций.

3. Прорывные решения, связанные с химизацией и структурной модификацией цементных бетонов, повышают потенциал использования ВФСУБ для создания монолитных силовых конструкций промышленного назначения, включая технологическое оборудование, машины и станки. Ограниченный перечень составов цементного литья, имеющих на отечественном рынке, состоит в основном из зарубежных продуктов, что вызывает необходимость создания более доступных по компонентам и стоимости, отечественных аналогов при сопоставимых технических показателях.

4. Распространение высокопрочных литевых цементных бетонов в области силовых конструкций, испытывающих длительные циклические нагрузки, сдерживается отсутствием систематизированной информации о причинно-следственных связях между структурными параметрами композита и характеристиками волн внутренних напряжений, включая особенности их влияния на барьер активации и скорость протекания деструктивных процессов.

5. Существует потребность в совершенствовании методик исследования вибродинамических свойств минеральных строительных материалов конструкционного назначения, основанных на создании и опытной апробации нового более технологичного и доступного научно-исследовательского оборудования, обеспечивающего фиксацию и автоматизированную оценку параметров откликов бетонных конструкций от циклических воздействий.

6. Большими перспективами в создании рецептур ВФСУБ обладает подход, сочетающий инструментарий численных методов моделирования, дополненный реальным экспериментом с задействованием испытательных стендов и прототипов машин, генерирующих вибрационную нагрузку в диапазоне частот основных видов промышленного оборудования.

7. Доступность современных микроэлектронных устройств, легкость их интеграции в различные системы, ускоряет переход промышленности к повсеместному использованию высокоскоростных станков с ЧПУ, которые стали основным видом обрабатывающего оборудования, устанавливаемого при проектировании или реконструкции строительной технологической системы. С учетом ширины диапазона вибрационной нагрузки для компоновки испытательного стенда целесообразно разработать малогабаритный прототип технологического оборудования, осуществляющего фрезерную обработку посредством числового программного управления режимами работы.

8. В общем случае процессы диссипации энергии в гетерогенных телах остаются сложным феноменом, который не может быть сведен к частному случаю вязкого или гистерезисного демпфирования. Тем не менее, идеализированные модели демпфирования, лежащие в основе математического аппарата большинства численных методов проектирования, позволяют получать удовлетворительное приближение к данным натурного эксперимента. Применительно к задачам бетоноведения предпочтительно рассматривать гистерезисное демпфирование. С целью повышения точности расчетов необходима разработка программного алгоритма корректной оценки влияния рецептурно-технологических факторов на формирование демпфирующих свойств гетерогенных материалов, включая ВФСУБ. Для этого в современные компьютерные программы мультифизического моделирования, необходимо вводить фактические характеристики бетонов, полученные в результате проведения прямого эксперимента, а не усредненные значения показателей материалов, погружаемые из библиотек стандартных данных.

ГЛАВА 2. Характеристика исходных материалов, методы исследований и методология работы

2.1 Характеристика применяемых сырьевых материалов

2.1.1 Вяжущие вещества (портландцементы)

При выполнении экспериментов использовались следующие виды портландцементов

- ЦЕМ I 42,5Н (ООО «Азия Цемент», РФ), ГОСТ 31108-2020;
- ЦЕМ 0 52,5Н (ООО «Азия Цемент», РФ), ГОСТ 31108-2020;
- СЕМ I 52,5 R (белый) («Adana Oyak Cimento», Турция), ГОСТ 965-89;
- Nanodur 5941Compound (композиционный ПЦ) (Dyckerhoff GmbH, Германия).

Данные о минеральном составе вяжущих веществ приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Минеральный состав портландцементов

Показатель	Марка		
	ЦЕМ I 42,5Н	ЦЕМ 0 52,5Н	СЕМ I 52,5R
Основные фазы, %			
Трехкальциевый силикат C_3S	66,1	67,2	51,2
Двухкальциевый силикат C_2S	13,1	12,0	19,2
Четырехкальциевый алюмоферрит C_4AF	11,5	11,9	0,7
Трехкальциевый алюминат C_3A	7,3	6,7	16,6

Нормальная густота цементного теста, сроки схватывания и равномерность изменения объема определялись по ГОСТ 310.3-76. Наличие признаков ложного схватывания устанавливалось по ГОСТ Р 56588-2015.

Активность цемента определялась на стандартных образцах в соответствии с ГОСТ 30744-2001, перед началом и после окончания исследований.

Вяжущее вещество Nanodur 5941 принято в качестве эталона при проведении сравнительной оценки эффективности разрабатываемых составов. Для определения его минерального и химического состава использовали методы селективного растворения и дифференциально-термического анализа (ДТА). Результаты ДТА-исследований представлены на рисунке 3. Отсутствие эндотермических эффектов в диапазоне 800–1000 °С на кривой ДТА и потерь массы пробы в указанном температурном диапазоне на термо-

гравиметрической кривой, в сочетании с данными химического анализа позволили установить отсутствие в составе Nanodur карбонатных компонентов.

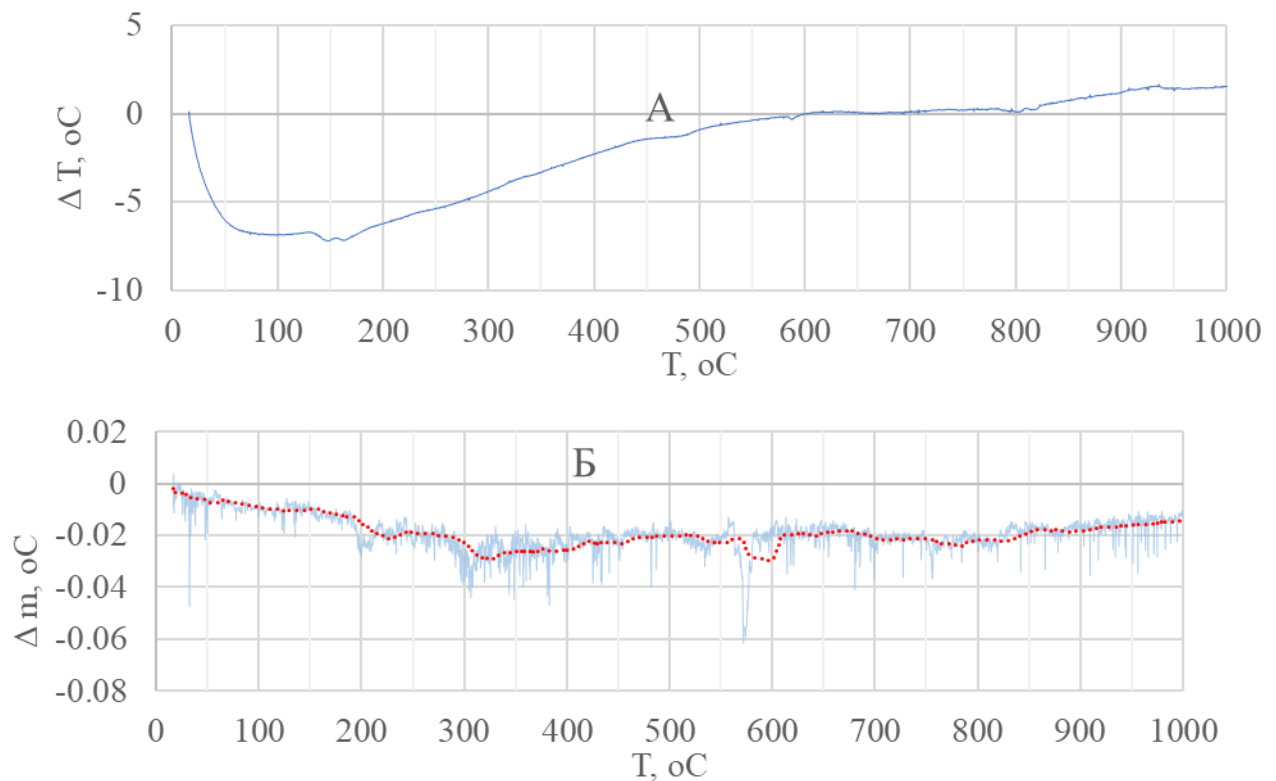


Рисунок 3 – Результаты термического анализа Nanodur 5941:

А – дифференциальная термограмма; Б – термогравиметрическая кривая

Удельную поверхность ($S_{уд}$) и средний размер частиц определяли по газопроницаемости анализируемой пробы на приборе ПСХ-10. Фактическая величина $S_{уд}$, установленная в ходе испытаний, составила 541,9 м²/кг, что существенно выше стандартных значений этого показателя для рядовых видов ПЦ (250–400 м²/кг). При этом средний эквивалентный диаметр частиц Nanodur составил 3,69 мкм.

Детализированное исследование гранулометрического состава производилось с помощью лазерного дифракционного анализатора. В результате получена гистограмма распределения размеров частиц и кумулятивная кривая гранулометрического состава (рисунок 4).

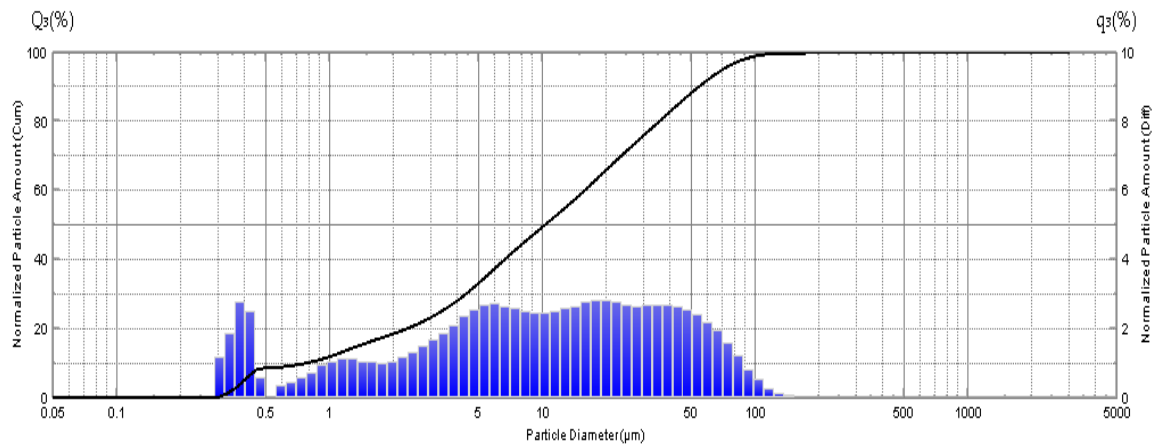


Рисунок 4 – Результаты гранулометрического анализа Nanodur 5941

Анализ данных показал, что 99.9 % объёма частиц материала ограничено диапазоном 0,3–154 мкм. При этом на гистограмме можно выделить три пика: первый – с серединой, соответствующей диаметру 0,41 мкм и значением FWHM 0,15 мкм; второй – с серединой 1,3 мкм (FWHM 0,88 мкм); третий – с серединой 39 мкм (FWHM 76 мкм). Таким образом, помимо преобладания в составе частиц микрометрического размера, выявлено присутствие значительной доли субмикрометрических частиц, что позволяет образовывать плотную реологически и химически активную дисперсную структуру.

2.1.2 Добавки-модификаторы бетонных смесей и бетонов

1) Пластифицирующие добавки:

- С-3 (ТУ 5870-002-58042865-03 с изменением №1, РФ);
- Melflux 1641F, 2651F, 5581F (BASF Construction Additives, Германия);
- PCE TR-6088 (Taishan Tianrun Factory, КНР);
- PCE-801, 6035 (Shanghai Bestsolution Co, КНР);
- Sika ViscoCrete T-150, 240 HE Plus, 226-P (Sika, РФ).

Эффективность действия пластифицирующих добавок оценивалась в соответствии с ГОСТ 30459-2008.

2) Регулирующие свойства бетона (тип – расширяющие):

- компенсатор усадки на основе сульфоалюмината кальция Denka CSA20 (Degussa Construction Systems Co., Япония);
- компенсатор усадки на основе сульфоалюмината кальция CSA Expansive Agent II (КНР);

3) Модификаторы поверхностного натяжения (авторский вариант):

- 2-бутоксиэтанол (бутилцеллозольв) 99+% (КНР) CAS 111-76-2;
- 2-этоксиэтанол (этилцеллозольв) ч.д.а. (АО «ЭКОС-1», РФ) ТУ 2632-032-44493179-99;

4) Минеральные добавки:

- микрокремнезём конденсированный неуплотнённый МК-85 ($S_{уд}=21000 \text{ м}^2/\text{кг}$) (ПАО «НЛМК», РФ) (ГОСТ Р 58894-2020));
 - высокоактивный метакаолин ВМК-45 ($S_{уд}=1800 \text{ м}^2/\text{кг}$);
 - микроальцит ММ-315 ($S_{уд}=230 \text{ м}^2/\text{кг}$);
 - молотая опока ($S_{уд}=350\text{--}400 \text{ м}^2/\text{кг}$). Опока отбиралась с промежуточного склада ООО «Азия-Цемент» (Сурско-Маисское месторождение, Пензенская обл.) Результаты рентгенофлуоресцентного и рентгенофазового анализов породы, (мас. %): химический состав: $\text{SiO}_2(73,9)$; $\text{Al}_2\text{O}_3(7,7)$; $\text{Fe}_2\text{O}_3(4, 2)$; $\text{R}_2\text{O} (2)$; $\text{CaO} (1,3)$; $\text{MgO} (1,1)$; ППП (остальное); минерально-фазовый состав: монтмориллонит (21); альбит (1); кристобалит (2); микроклин (4); кварц (11); аморфный кремнезём (61);
 - диатомит Инзенского месторождения;
 - молотый песок Сурского месторождения ($S_{уд} = 350 \text{ см}^2/\text{кг}$ (ГОСТ 8736-2014));
 - молотый бой оконного стекла $S_{уд} = 550\text{--}650 \text{ см}^2/\text{кг}$ ($\text{SiO}_2\text{—} 69,0 \%$; $\text{CaO} \text{—} 6,5 \%$; $\text{MgO} \text{—} 4,0 \%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{—}1,0 \%$; $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—} 5,0 \%$; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} \text{—} 14,5 \%$);
 - молотый отход производства газосиликата ($S_{уд}=350$);
 - кварцевая мука (маршалит) Silverbond 15 EW R300 ($S_{уд}=1100 \text{ м}^2/\text{кг}$, Раменский ГОК);
- 5) Для исследования отдельных показателей в качестве добавок использовали:
- эластичный кремнийорганический полимер (силикон) [ООО «ПОЛИДЕЛ», РФ] с твёрдостью 60 единиц (по Шору/шкала А), плотностью 1220 кг/м^3 и $E_d=1,5 \text{ МПа}$;
 - суперабсорбирующий полимер (САП) на основе гранулированного полиакрилата натрия ($\varnothing 50\text{--}300 \text{ мкм}$) [AE-Chemie, Германия];
 - эпоксидный компаунд СМЭЛ 04-25 [АО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ», РФ].

2.1.3 Заполнители и фибра

Песок (по ГОСТ 8736-2014):

- фракционированный фр. 0–0,63 мм, фр. 0,63–2,5 мм (г. Красноярск).
- Сурского месторождения (Пензенская обл.) $M_k=1,4$;
- Песчанковского месторождения (Саратовская обл.) $M_k=2,33$.

Гранитный заполнитель:

- фракция 1,25–2,5мм, полученная дроблением гранитного щебня М1400.

Микрофибра двух видов: стальная латунированная волновой конфигурации длиной 15 мм ($\varnothing 0,27$) и полипропиленовая (ПП) с длиной волокон 6 мм ($\varnothing 0,022$).

2.2 Приборы и методы исследования свойств

2.2.1 Стандартные методы

Исследование прочностных свойств при сжатии, растяжении, изгибе. Прочность образцов цементного камня и бетона определялась в соответствии с ГОСТ 310.4-81 и ГОСТ 10180-2012. При испытании цементного камня использовали образцы следующих типоразмеров: кубы с ребром 30 мм; балочки 40×40×160 мм; кубы с ребром 50 мм. Прочность определялась через 1, 7 и 28 суток твердения в нормальных условиях. Для ряда образцов были проведены дополнительные испытания в возрасте, превышающем 28 суток.

Определение характеристик трещиностойкости. Характеристики трещиностойкости бетона определяли по методу неравновесных испытаний, изложенному в ГОСТ 29167-2021. Неравновесные испытания характеризуются потерей устойчивости процесса деформирования образца в момент локализации деформации по достижении максимальной нагрузки, с соответствующим динамическим развитием магистральной трещины.

Контрольные образцы изготавливали в виде балок квадратного сечения (1 тип) для испытания на изгиб (рисунок 5).

Трещиностойкость оценивали по величине условного критического коэффициента интенсивности напряжений ($\text{Па} \cdot \text{м}^{0,5}$), который рассчитывали по зависимости:

$$K_c^* = \frac{3F_c L_0}{2b^{3/2}t} \sqrt{\frac{a_0}{b}} (1.93 - 3.07\lambda + 14.53\lambda^2 - 25.11\lambda^3 + 25.8\lambda^4), \quad (15)$$

где b , t – размеры образца, м;

a_0 – длина начального надреза, м;

F_c – нагрузка, соответствующая динамическому началу движения магистральной трещины, Н;

$\lambda = a_0/b$ – относительная длина начального надреза.

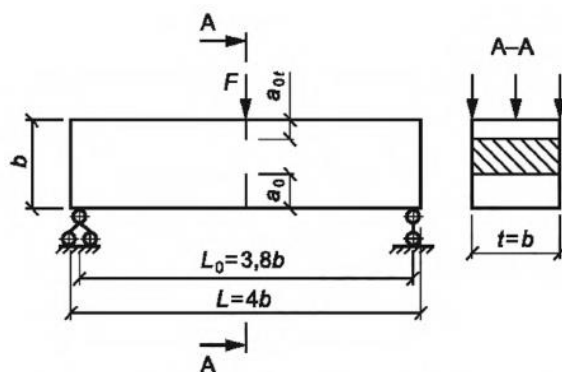


Рисунок 5 – Размеры и схема испытаний образцов 1-го типа

Определение физических и теплотехнических свойств. Влажность сырьевых материалов определялась с помощью высокоточного анализатора влажности «Эвлас-2М» (методика ФГУП "Уральский научно-исследовательский институт метрологии").

Удельная поверхность порошковых материалов определялась на приборе «ПСХ-10» (ГОСТ 310.2-76, ГОСТ 23789-2018, ГОСТ 21043-87).

Истинную плотность определяли согласно методике ГОСТ Р 56300-2014 «Огнеупоры и огнеупорное сырье. Методы определения истинной плотности».

Среднюю плотность образцов определяли по ГОСТ 12730.1-2020 «Бетоны. Методы определения плотности».

Измерение теплопроводности проводили на приборе ИТП-МГ4 при стационарном тепловом режиме по ГОСТ 7076-99 и методом цилиндрического зонда по ГОСТ 30256-94 в соответствии с требованиями ГОСТ 7076-99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме».

Гранулометрический состав – лазерный дифракционный анализатор Shimadzu SALD-3101.

Коэффициент ползучести, модуль упругости и коэффициент Пуассона определялись в соответствии с ГОСТ 24452-2023, ГОСТ 24544-2020 на образцах-призмах 70×70×400 и 40×40×160 мм в зависимости от максимальной крупности заполнителя.

Модуль упругости (в т.ч. динамический), ползучесть, усадка, кинетика гидратации определялись по усовершенствованным автором методикам, приведенным в соответствующих разделах диссертации.

Исследование продуктов гидратации проводили способом дериватографии на установке-дериватографе Термоскан-2, обеспечивающей дифференциально-термический (ДТА) и термогравиметрический (ТГА) анализы посредством измерения температуры, а также теплоты фазовых переходных процессов и величины потери веса порошкообразных образцов при нагреве с постоянной скоростью при кристаллизации, полиморфных превращениях и термическом разложении.

Для полуколичественного анализа веществ съемку производили на:

- рентгенофлуоресцентном спектрометре марки AxiosFAST (в заводской лаборатории ООО «Азия Цемент»). Он укомплектован рентгеновской трубкой SST-mAX50 мощностью 4.0 кВт. Основное назначение – экспресс-анализ химического состава материалов с пределами обнаружения элементов на уровне от 0,1 до 100 масс.%. Спектрометр Axios внесен в Государственный реестр средств измерений;

- дифрактометре Empyrean PANalytical PIXcel3D (Нидерланды). Режим съемки: излучение – CuK, угол поворота $2\theta=5-70^\circ$, скорость съемки – $0,0131^\circ/\text{мин}$, время интеграции – 150 с. Определение фазового состава образцов выполнено методом Ханавальта на основании открытой базы данных по кристаллографии.

2.2.2 Авторские методы и испытательное оборудование

Экспериментальные исследования вибродинамических свойств разрабатываемых бетонов проводили на установке, сконструированной и усовершенствованной с учетом особенностей, выявленных в ходе испытаний мезомodelей (образцов-балочек). Последовательность проведения вибродинамических испытаний показана на рисунке 6.

Установка обеспечивает проведение экспериментов методами вынужденных и свободных колебаний, что дополняет ее функционал показателем вибростойкости. По первому методу используется консольная схема закрепления образцов, а по второму – свободное расположение образца на узких опорах. Более подробное описание конструкции и принципа работы установки для вибродинамических испытаний изложено в главе 3.

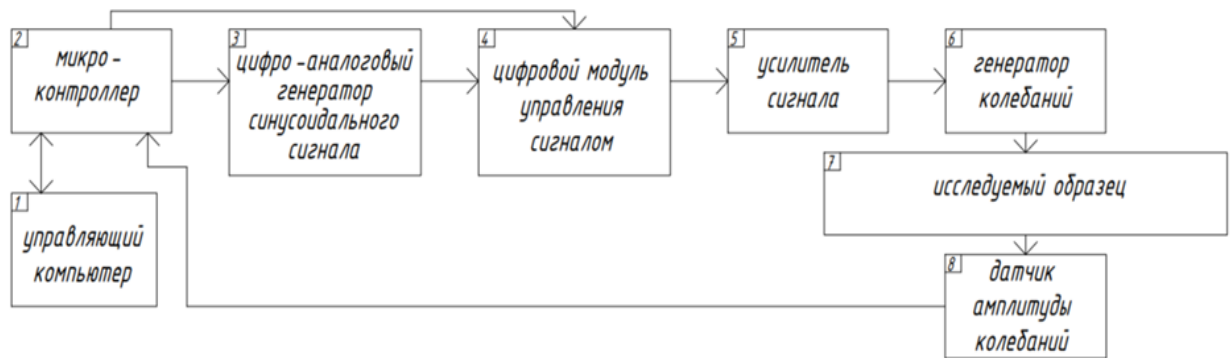


Рисунок 6 – Схема проведения вибродинамических испытаний методом вынужденных колебаний

Растекаемость бетонной смеси и пластифицирующее действие добавок оценивали по диаметру расплава конуса Хагерманна. В ряде предварительных экспериментов, определялся диаметр расплава цилиндра размерами 30×30 мм. При использовании конуса Хагерманна вычислялась относительная степень растекания (Γ) [68]:

$$\Gamma = \left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1, \quad (16)$$

где D – диаметр расплава, мм;

d – диаметр основания конуса, мм.

Пуццолановую активность минеральных добавок определяли экспресс-методом по способу, предложенному в работе [69]. Сначала навески проб помещали в химические стаканы и добавляли 10%-й раствор NaOH. Затем пробы в стаканах перемешивали в течение трех минут и устанавливали в термостат, где выдерживали два часа при температуре 90 °С. После охлаждения содержимое стаканов фильтровали и взвешивали. Коэффициент пуццолановой активности (K , %) вычислялся по формуле

$$K = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100, \quad (17)$$

где m_1 – масса навески материала до реакции, г;

m_2 – масса непрореагировавшего остатка, г.

Ползучесть и модуль упругости (статический). Стандартизированный метод исследования ползучести бетонов описан в ГОСТ 24544-81 и заключается в измерении линейного размера образцов-призм, находящихся в сжатом напряжённо-деформированном состоянии в течение определенного времени. Нагрузка поддерживается пружинами сжатия. Трудности заключаются в большой материалоемкости образцов и испытательных стендов. Как показывает практика, для установки образца в стенд, центровки и загрузки

ния необходимы усилия нескольких человек, а установка датчиков перемещения при формировании образцов-призм осложняется закладкой реперов на нескольких боковых гранях.

Актуальная версия ГОСТ 24544-2020 предусматривает упрощение испытаний по методу определения деформаций ползучести при четырехточечном изгибе. Рекомендуемые размеры образцов-балок 1100×100×70 мм. Предлагаемым усовершенствованием является испытание образцов-балочек длиной до 300 мм. Разработанная методика позволяет применять в качестве измерительного инструмента один датчик перемещения даже в случае нескольких исследуемых образцов, в отличие от существующей методики, предусматривающей монтаж трех датчиков на один образец на всё время испытания. Это достигается за счёт установки штанги с датчиком непосредственно на образец (зона контакта расположена в точках нулевого прогиба образца), а не на каркас измерительного стенда, при этом базой измерения является поверочная линейка типа ШМ. Опоры имеют необходимые степени свободы, что обеспечивает их полный контакт с гранями образца. Трёхточечная схема сопряжения измерительной штанги и образца позволяет снизить требования к точности геометрии граней. В ходе экспериментальной проверки метода получены удовлетворительные результаты со специально изготовленными образцами, имеющими винтообразное искривление. Устойчивость измерительной штанги обеспечивается противовесами. Увеличение количества одновременно испытываемых образцов продиктовано длительностью эксперимента (шесть месяцев и более). Кроме того, в случае одновременного испытания образцов разных серий обеспечиваются единые температурно-влажностные условия экспозиции.

Для сборки стенда была отформована партия станин из мелкозернистого высокопрочного бетона (позиция 2 на рисунке 7), а в качестве комплектующих подобраны типовые элементы, облегчающие сборку.

Установка хорошо показала себя при определении модуля упругости первого рода. Нагружение образцов осуществляется ступенчато с помощью грузов. Получаемая точечная диаграмма в координатах «нагрузка-прогиб» корректно аппроксимируется линейной функцией. В ходе экспериментов установлено, что в диапазоне нагружения $(0,1 - 0,7)F_{\text{разр}}$ значение коэффициента детерминации (R-квадрат) превышает 0,99 для большинства материалов. Модуль упругости (Е, ГПа) рассчитывался по формуле:

$$E = \frac{0.2129 \cdot \Delta F \cdot L^3}{b \cdot h^3 \cdot \Delta \omega \cdot 1000}, \quad (18)$$

где ΔF – изменение нагрузки, Н;

L – расстояние между нижними опорами, мм;

b – средняя ширина сечения образца, мм;

h – средняя высота сечения образца, мм;

$\Delta \omega$ – изменение величины прогиба, мм.

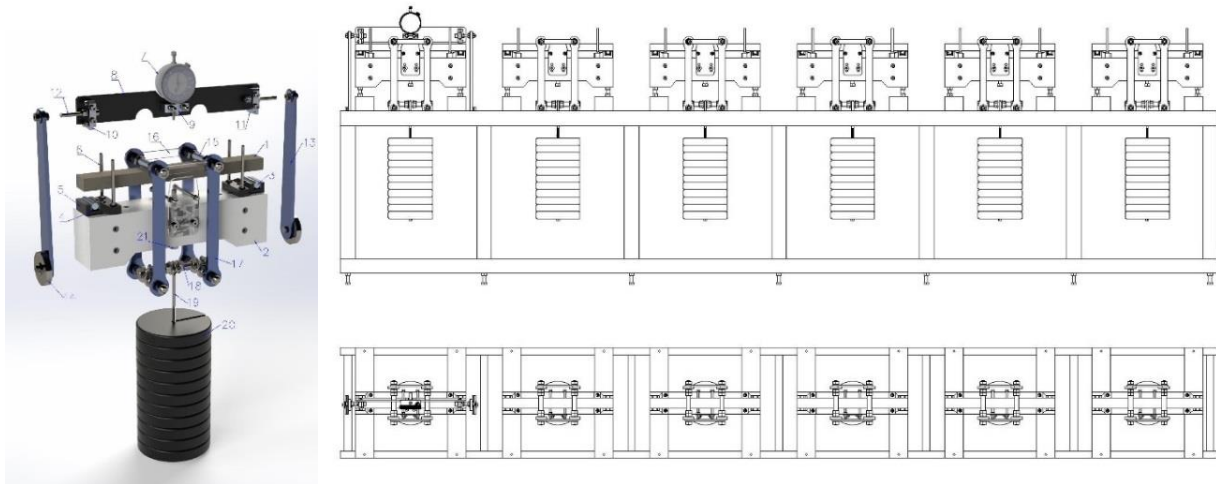


Рисунок 7 – Схема установки и стенда для оценки ползучести и модуля упругости:

1 – бетонный образец-балочка; 2 – станина из ВФБ; 3 – опора нижняя; 4 – компенсирующий элемент; 5 – фиксатор опоры; 6 – ограничивающий стержень; 7 – датчик перемещения; 8 – измерительная штанга; 9 – хомут крепления датчика; 10 – двухконтактная опора штанги; 11 – одноконтактная опора штанги; 12 – ось крепления тяги противовеса; 13 – тяга противовеса; 14 – противовес; 15 – опора верхняя; 16 – фиксатор межопорного расстояния 17 – тяга; 18 – траверса; 19 – штанга; 20 – нагружающие элементы

Численные модели поведения материалов при четырёхточечном изгибе с учётом степеней свободы опор, построенные в среде (ANSYS), показаны на рисунке 8.

Анализ показал сходимость данных «нагрузка-прогиб», полученных при измерении на стенде (рисунок 7) и при численном моделировании образцов материалов различной природы (металлы, бетон). Характеристики разработанной установки: схема нагружения – четырёхточечный изгиб; размеры образцов – 300×19×28 мм; размеры установки – 350×200×110 мм; масса установки – 4.5 кг; погрешность измерения прогиба – 5 мкм; диапазон измерения прогиба 0–10 мм; максимальная нагрузка – 50 кг.

Метод позволяет определять прочностные и деформативные характеристики мелкозернистого бетона, цементного камня бетонов и других материалов. Недостатками яв-

ляются невозможность исследований щебеночного бетона и определения коэффициента Пуассона.

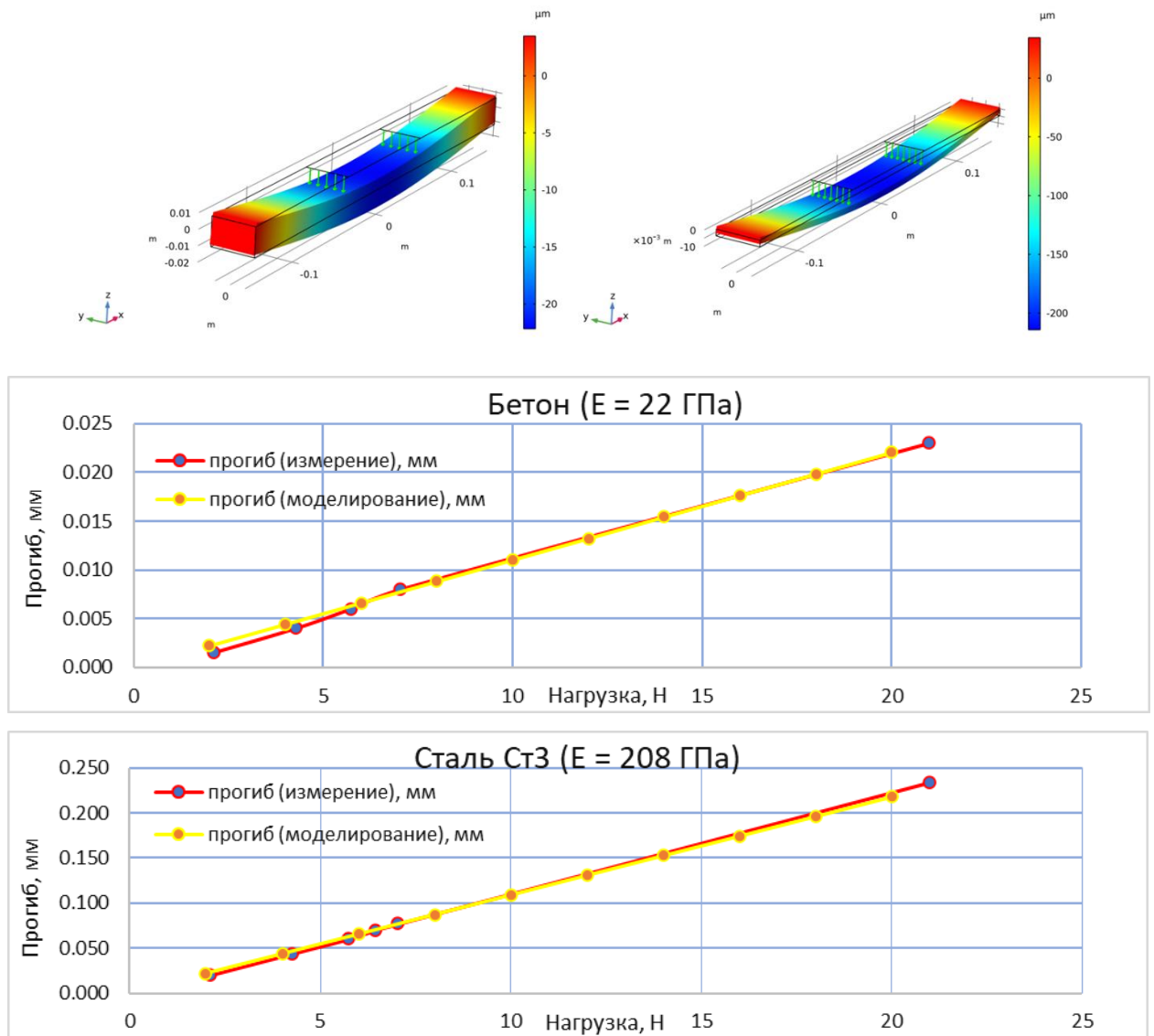


Рисунок 8 – Численные модели поведения конструкционных материалов при четырёхточечном изгибе

Коэффициент Пуассона определялся в соответствии с ГОСТ 24452-2023.

В качестве нагружающего устройства использован гидравлический пресс ($P_{\max}=50$ тс). Измерение деформации осуществлялось тензорезистивным способом с наклеиванием пленочных тензорезисторов (материал токопроводящего слоя – константан, материал подложки – фенольная пленка). Размер базы тензорезистора подбирался, исходя из особенностей макроструктуры исследуемого материала. Сведения об используемых типах тензорезисторов приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Тензорезисторы для бетонов различных типов

Обозначение тензорезистора	Номинальное сопротивление, Ом	Величина базы, мм	Испытуемые материалы
BF350-3AA	350	3	цементный камень/порошковый бетон
BX120-10AA	120	10	цементный камень, мелкозернистый бетон
BX120-50AA	120	50	щебеночный бетон

Усовершенствование коснулось замены традиционной системы измерений деформаций на основе комплекта сопротивлений системой на базе несбалансированных мостов Уитстона, которая существенно упрощает работу и позволяет автоматически строить диаграммы нагружения. Компенсация температурной погрешности обеспечивается за счет полумостовой схемы включения тензорезисторов, а оцифровка сигналов – 24-битным АЦП HX711, оснащенный двумя дифференциальными входами с коэффициентами усиления 128 и 32. Это позволило решить задачу параллельной работы датчиков измерения продольных и поперечных деформаций от одного АЦП. В качестве элемента управления выбран микроконтроллер на базе ATmega328, сигнал с которого передается в компьютер через последовательный порт. Схема подключения представлена на рисунке 9.

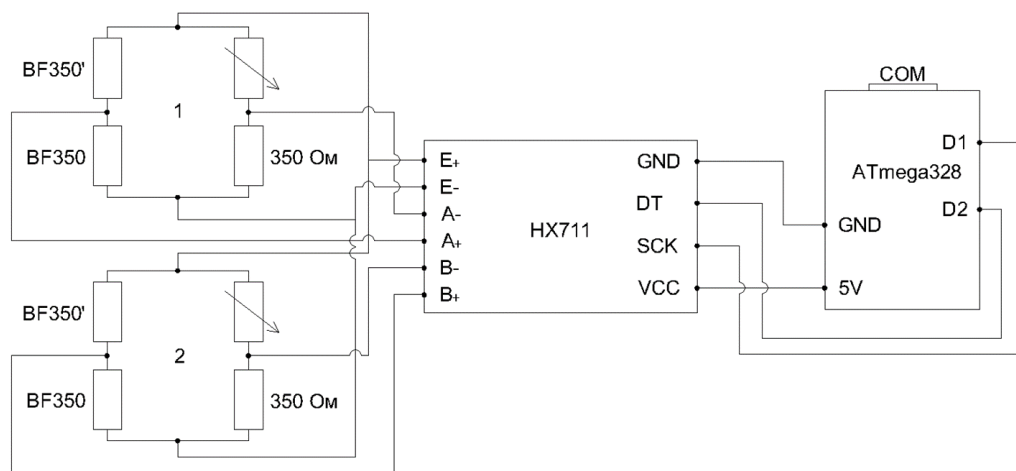


Рисунок 9 – Схема оцифровки сигнала двух тензорезисторов BF350

(знаком «'» отмечены тензорезисторы, наклеенные для термокомпенсации)

Автоматический вывод значений деформации реализован программным кодом, оперирующим предварительно полученным уравнением зависимости относительной

деформации от единиц аналого-цифрового преобразования без необходимости пересчёта сопротивлений и напряжений:

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot (A_0 - A_{\text{см}})}{GF \cdot g \cdot 2^{n-1} + GF \cdot (A_{\text{см}} - A_0 - 0.5)}, \quad (19)$$

где $A_{\text{см}}$ – число единиц аналого-цифрового преобразования при заданной нагрузке;

A_0 – начальное значение преобразования (фактический начальный дисбаланс измерительного моста);

GF – коэффициент тензочувствительности;

g – коэффициент усиления сигнала;

n – разрядность АЦП.

Усадка бетона исследовалась способом определения линейной относительной деформации усадки ($\varepsilon_{\text{ус}}$) образцов-призм размером $40 \times 40 \times 160$ мм (в соответствии с ГОСТ 24544-2020).

Образцы извлекали из форм после 24 часов выдержки с момента заливки. Затем производили калибровку поверхностей реперов и определяли первоначальный размер образца. Образцы помещали в камеру нормального твердения, где выдерживали в течение 3–28 суток, в соответствии с планом эксперимента. Используемое лабораторное оборудование для исследования усадки представлено на рисунке 10.

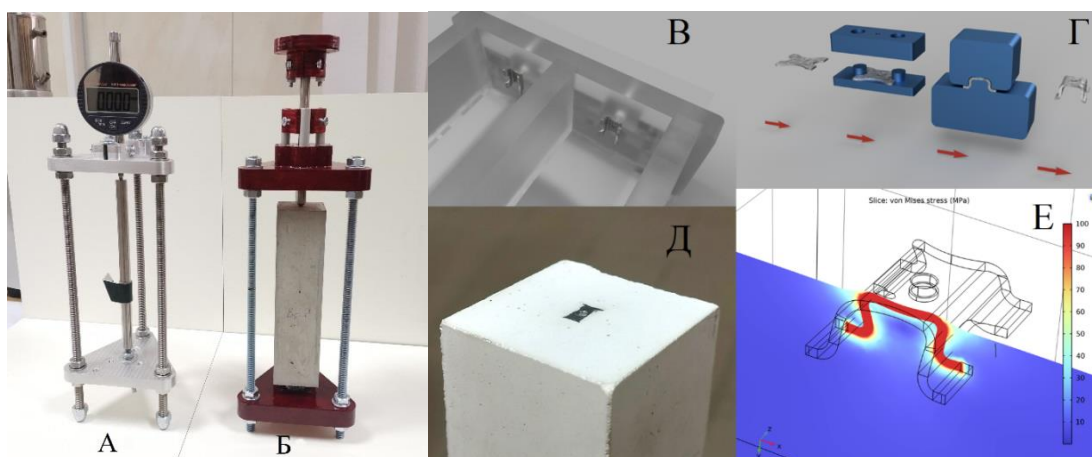


Рисунок 10 – Лабораторный комплекс исследования усадки бетона:

А – измерительный стенд; Б – калибровочный стенд; В – фрагмент формы в сборке;

Г – процесс изготовления репера; Д, Е – вид экспериментального образца с репером и результат конечно-элементного моделирования усадки

В ходе выполнения исследований установлена необходимость более детального изучения процесса накопления деформаций бетонной смеси во всём временном интервале твердения, включая начальный этап, когда происходит переход материала от вязко-

текучего состояния в твердое тело. Что привело к необходимости совершенствования метода и лабораторной оснастки для исследования усадочных деформаций бетонной смеси на начальных этапах структурообразования.

Усовершенствование лабораторной оснастки позволило повысить точность измерения знакопеременных деформаций бетонной смеси преимущественно в раннем возрасте, а также снизить трудоёмкость и длительность за счет возможности определения общей усадки материала по стандартной методике (ГОСТ 24544-2020) без необходимости изготовления дополнительных образцов. Этому способствует установка теплорассеивающих элементов на верхней части разборного корпуса устройства, наличие дополнительного вкладыша из силиконовой резины с утолщениями на торцевых стенках, обеспечивающими формирование в процессе затвердевания минеральной смеси стандартных образцов-призм, а также надёжную установку подвижного и неподвижного репера, относительное смещение которых передается на шток датчика линейных перемещений часового типа. После затвердевания образец извлекается из устройства для определения деформаций его усадки на последующих этапах твердения материала по стандартизированной методике.

Разработанное устройство функционирует следующим образом (рисунок 11). В металлический разборный корпус 1 помещается вкладыш 2 из силиконовой резины с твёрдостью по Шору 20–40 единиц (шкала А), который, не препятствуя собственным деформациям образца, обеспечивает герметичность системы и быструю распалубку после окончания измерений. С внутренней стороны вкладыша закрепляются реперы 3 из нержавеющей стали. Один репер жёстко крепится к корпусу с помощью пластины 4 с закреплённым в ней резьбовым штифтом 5, проходящим через отверстие в торцевой стенке вкладыша. Другой репер закреплён на подвижном стержне 6, соединённом посредством муфты 7 с цилиндрической направляющей 8, положение которой отслеживается датчиком линейного перемещения 9. Герметичность измерительной системы обеспечивается утолщением торцевой стенки вкладыша в областях отверстий. Перемещение направляющей ограничивается шариковой втулкой 10. Элементы удерживаются в заданном положении с помощью крепёжных пластин 11, соединяемых стержнями с резьбой 12. Для соединения корпуса используются резьбовые штанги 13. После заполнения устройства исследуемым составом 14 сверху устанавливается крышка 15, снабжённая

теплоотводящими элементами 16. Для контроля температуры в корпусе предусмотрены отверстия под установку термодатчиков.

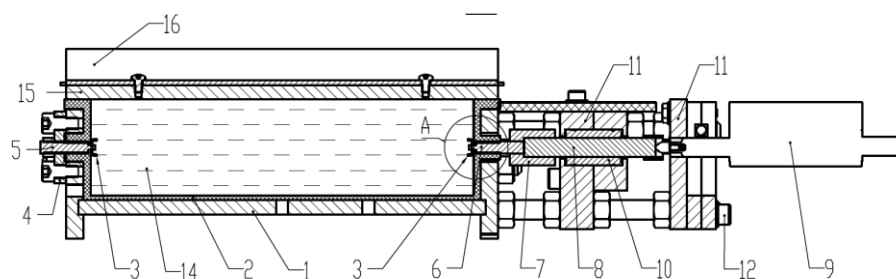


Рисунок 11 – Устройство для фиксирования величины усадочных деформаций на начальных этапах структурообразования

Точность, а также высокая чувствительность устройства при определении деформаций с момента начала структурообразования, обеспечиваются пренебрежительно малой величиной силы, необходимой для перемещения подвижного репера, находящегося в равновесии за счёт упругости стенки формы. Кроме того, форма и размер используемых реперов позволяют производить определение деформаций после распалубки образца по стандартной методике [70].

Калориметрия, стандартизированная в настоящее время для оценки тепловыделения бетона, обладает потенциалом для разработки на ее основе перспективных и более информативных методов, включая исследование влияния рецептурных факторов на интенсивность экзотермических реакций при твердении цементных материалов. Действующий ГОСТ 24316-2022 предполагает использование методов адиабатической калориметрии с целью фиксации показаний скорости подъема температуры и проведения расчетов, касающихся экзотермии массивных бетонных конструкций.

Анализ литературных данных [71–76] показывает, что калориметрия любого вида имеет свои особенности, затрудняющие развитие на ее основе методов для решения бетоноведческих задач. Изотермическая калориметрия, позволяя измерять тепловые потоки низкой интенсивности, не учитывает эффекты, связанные с саморазогревом смеси. В свою очередь результаты адиабатических методов искажаются из-за влияния экзотермии твердеющей смеси, особенно при исследовании высокоактивных вяжущих.

В странах ЕС и США приняты стандарты (DIN EN 12390-14, ASTM C1753), основанные на использовании полуадиабатического калориметра в строительном материаловедении. А.В. Ушеров-Маршак с сотрудниками отмечают положительные стороны применения полуадиабатической калориметрии для оценки совместимости пластифици-

рующих добавок с цементным вяжущим [72]. В работах [77, 78] обосновывается применение полуадиабатической калориметрии для определения активности цементных вяжущих.

Учитывая положительный опыт применения и перспективы совершенствования термосных калориметров, в рамках диссертации была проведена модернизация таких устройств с целью их адаптации под исследования процессов твердения рецептурных систем, характерных для составов ВФСУБ. Первоначально прототип калориметра имел вид, представленный на рисунке 12.

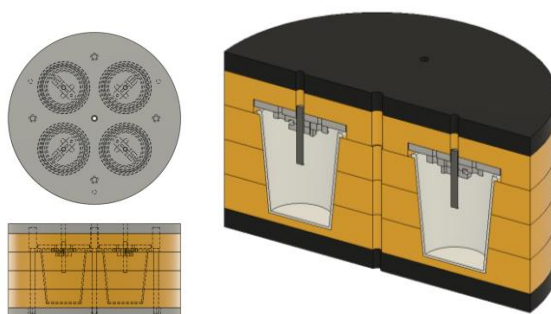


Рисунок 12 – Прототип первой модели полуадиабатического калориметра

Основой конструкции является блок из экструдированного пенополистирола, имеющий четыре глухих конических отверстия для установки емкостей с пробами. Калориметр оснащен теплоизолирующей крышкой с четырьмя установленными в ней программируемыми термометрами типа ds18b20. В диапазоне рабочих температур (20–80 °C) фактическую погрешность измерительной системы удалось снизить до приемлемого уровня ($\pm 0,2$ °C) за счет калибровки, добавления кривых поправок, а также алгоритмизации процесса статистической обработки данных. Полученные таким образом значения температур с заданной частотой поступают на микроконтроллер, а затем передаются в обрабатывающую программу для построения термометрических кривых.

Как и ожидалось, главный недостаток термосных калориметров проявился из-за зависимости скорости и степени полноты реакции в калориметрической ячейке от температуры: наличие положительной обратной связи приводит к саморазогреву навески и ускорению регистрируемых процессов. Для широкого круга практических задач технического анализа обычно достаточно получения сравнительных данных об активности цемента и его функциональной совместимости с добавкой. Для научных исследований такие данные являются малоинформативными по причине невозможности сопоставления величин экзотермии цементных систем при различной температуре. Построение

универсальной математической модели энерговыведения в рамках развития полуадиабатической калориметрии требует оперирования такими параметрами как энергия активации реакций и зависимость теплоёмкости реагентов от температуры.

Интересным решением представляется использование термосных калориметрических ячеек с набором сменных теплоизоляционных оболочек. В таком случае, изменяя толщину теплоизолирующей оболочки, можно моделировать твердение бетона в реальных условиях.

Определение вида зависимостей тепловых потерь от градиента температур внутри и снаружи калориметрической ячейки осуществлялось путем снятия данных кинетики остывания воды (рисунок 13, а). По значениям ΔT для каждой калориметрической ячейки составлялись математические модели, адекватность которых определялась по величине коэффициента детерминации (R-квадрат). При вычислении теплотерь учитывались справочные данные по зависимости удельной теплоёмкости воды от температуры (13, б)

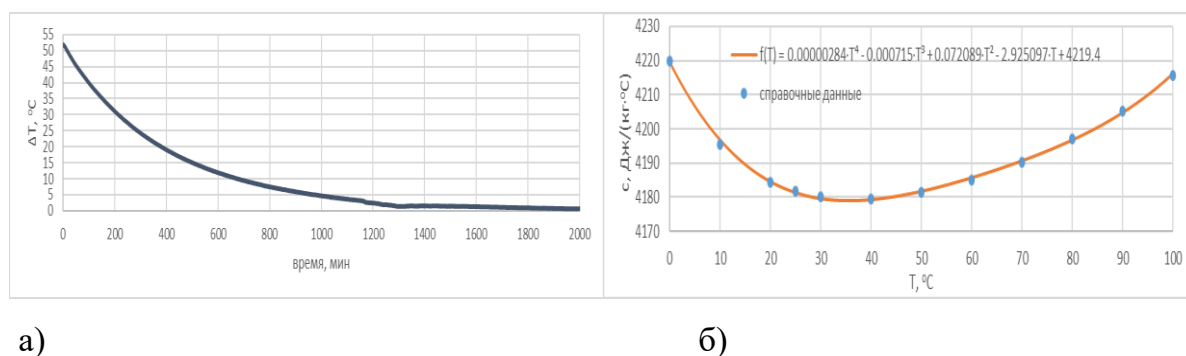


Рисунок 13 – Вспомогательные графики для обработки данных полуадиабатической калориметрии: а) остывание воды в термосном калориметре; б) модель зависимости теплоёмкости воды от температуры

График на рисунке 13 а аппроксимируется экспоненциальной функцией вида

$$f(t) = a \cdot e^{-b \cdot t} + c. \quad (20)$$

Значения числовых коэффициентов a , b , c вычисляли в программной среде Python с использованием библиотек SciPy и NumPy. Полученные данные использовали для расчета кинетики теплотерь каждой калориметрической ячейки (рисунок 14).

Определение кинетики тепловыделения при гидратации производили следующим образом. Сначала навески сухих компонентов помещали в лабораторный миксер, где затем производилось их затворение водой или раствором анализируемой добавки. Смесь

перемешивали в течение 20–30 секунд на малой скорости и перегружали в пластиковую емкость, которая взвешивалась и устанавливалась в калориметрическую ячейку.

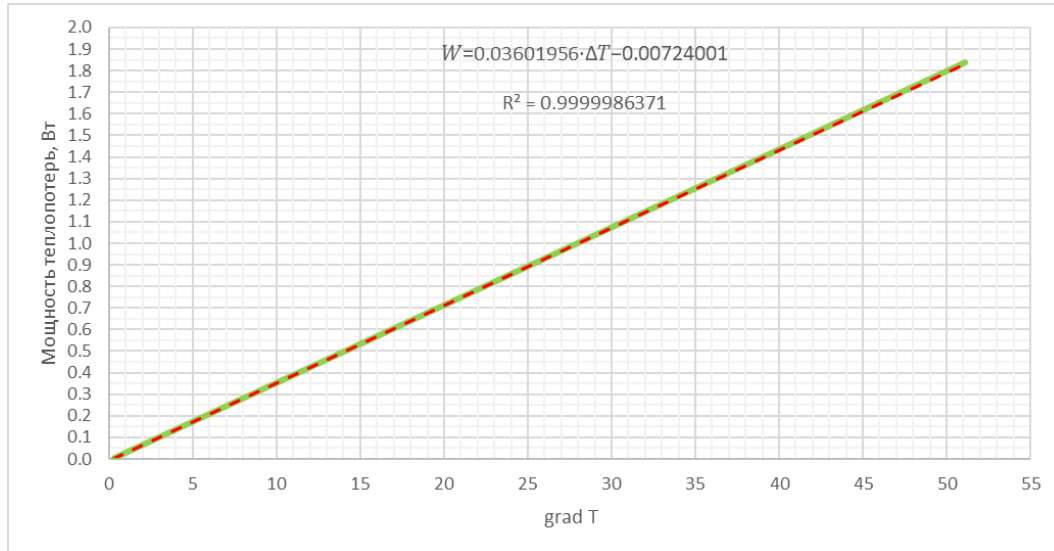


Рисунок 14 – Зависимость теплопотерь (W) от разности температур внутри и снаружи калориметрической ячейки ($\text{grad } T$)

Показания температуры записывались с периодичностью 1 мин в течение 48 часов твердения. Общее тепловыделение за период (Дж) рассчитывали по формуле:

$$Q = c_{\text{см}} \cdot m_{\text{см}} \cdot (T_2 - T_1) + W \cdot t_{\text{п}}, \quad (21)$$

где $c_{\text{см}}$ – удельная теплоёмкость смеси, Дж/(кг·°C);

$m_{\text{см}}$ – масса смеси, кг;

T_2, T_1 – средняя температура смеси в конце и в начале периода;

W – мощность теплопотерь при определённой разности температур соответствующего периода;

$t_{\text{п}}$ – продолжительность периода, с.

Удельная теплоёмкость смеси определялась согласно правилу аддитивности по формуле:

$$c_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \left(\frac{m_i}{m_{\text{см}}} \right), \quad (22)$$

где n – количество компонентов в смеси;

c_i – удельная теплоёмкость i -го компонента, Дж/(кг·°C);

m_i – масса i -го компонента, кг.

На заключительном этапе производилось построение кумулятивной кривой тепловыделения (рисунок 15), по которой определяли продолжительность интересующего периода (прединдукционного, индукционного и постиндукционного).

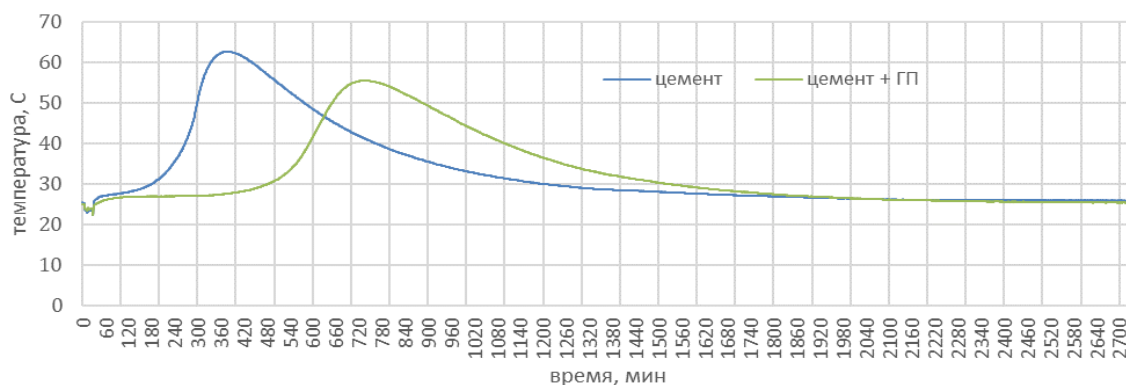


Рисунок 15 – Термометрические кривые гидратации составов:

1) ПЦ ЦЕМ I 42.5Н; 2) ПЦ + 1% Melflux 5581f (В/Ц=0.5)

Последующая апробация работы установки показала достижимость заявленных показателей, однако ряд отмеченных ранее недостатков послужил импульсом для дальнейшего совершенствования конструкции. В результате разработан лабораторный калориметрический комплекс, основу которого составили отдельные калориметрические ячейки (рисунок 16), а термодатчики объединены в сеть с микроконтроллером и блоком управления в соответствии со схемой на рисунке 17.

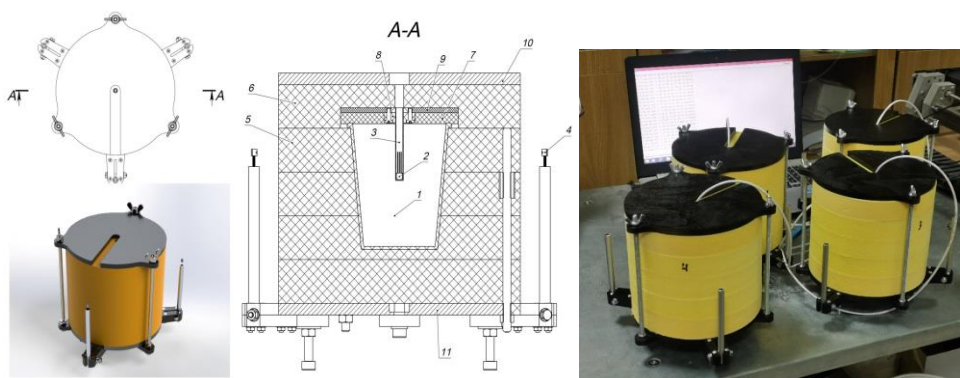


Рисунок 16 – Схема калориметрической ячейки и общий вид окончательной компоновки

калориметра: 1 – емкость для навески; 2 – внутренний термодатчик; 3 – гильза термодатчика; 4 – наружные термодатчики; 5 – теплоизолирующая оболочка; 6 – теплоизолирующая крышка; 7 – уплотнитель; 8 – резиновая манжета; 9 – крепежная пластина; 10 – прижимная пластина; 11 – основание

Для определения наружной температуры используется три термодатчика ($T_{Дн}$), показаниям которых в реальном времени строится температурное поле. Вместе с предварительной калибровкой это позволяет повысить точность определения тепловых потерь прибора и производить последовательную во времени загрузку проб без влияния на достоверность данных. Температурные данные записываются с заданной периодичностью на подключаемую к микроконтроллеру карту памяти.

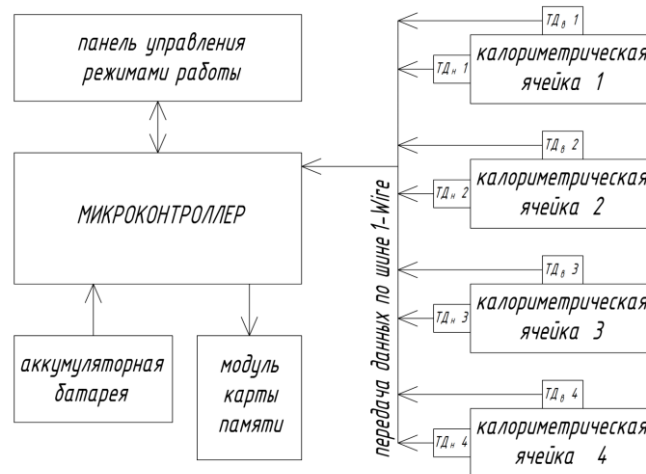


Рисунок 17 – Блок-схема лабораторного калориметрического комплекса

Эксплуатация окончательного варианта конструкции калориметра показала, что внесенные изменения упрощают процесс изготовления устройства, повышают автономность работы и ускоряют процесс подготовки к измерениям непосредственно на месте формирования и укладки смеси.

Коэффициент линейного теплового расширения (α_t) определялся следующим образом (числа в скобках приведены в соответствии со схемой на рисунке 18, а). Предварительно завернутый в полимерную плёнку призматический бетонный образец (1) длиной 300 мм термостатируется в холодильной камере при температуре 5 °С в течение трех-пяти часов, после чего устанавливается в измерительную раму (4), оснащённую датчиком линейного перемещения (2) с ценой деления 0,2 мкм. После установки начинается фиксация экспериментальных данных. Для предотвращения тепловых деформаций измерительной системы контакт образца и рамы осуществляется через стальные опоры (5), снабжённые наконечниками из инварного сплава (8) с установленными на них теплоотсеивающими элементами (6). Затем прибор с установленным образцом термостатируется при температуре 20–30 °С до прекращения изменения показаний датчика перемещения. Вычисление величины α_t производится по формуле:

$$\alpha_t = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta T}, \quad (23)$$

где ΔL – изменение длины образца, м;

L_0 – базовая длина образца, м;

ΔT – разность температур между начальным (~5 °С) и конечным (20–30 °С) состояниями, °С.

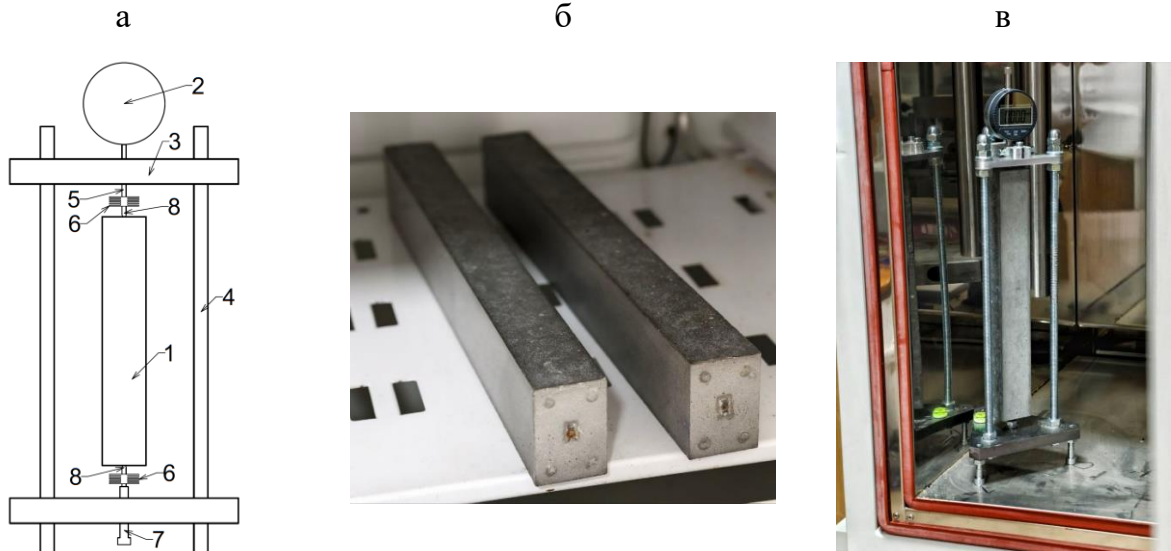


Рисунок 18 – Определение коэффициента линейного теплового расширения:
а – схема установки; б – термостатирование образцов в климатической камере;
в – определение деформации образца

Таким образом осуществляется определение коэффициента в температурном диапазоне, характерном для эксплуатации станков в промышленных условиях.

Было исследовано изменение динамических показателей бетона при циклическом замораживании и оттаивании (рисунок 19).



Рисунок 19 – Контрольные образцы для оценки долговечности бетона

Для этого серии экспериментальных образцов с добавками подвергались 30 циклам «замораживание ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) – оттаивание ($+20\text{ }^{\circ}\text{C}$)» с частотой два цикла в сутки.

2.3 Методологическая основа исследований

Методологической основой являются общенаучные подходы, базирующиеся на анализе, сравнении и обобщении экспериментальных данных, дополненные методами

математического планирования и принципами системного подхода. В задачи диссертационной работы входило установление зависимостей «состав – технология – структура – свойства».

Исследования исходят из применимости основных положений полиструктурной теории композиционных строительных материалов, разработанной академиком В.И. Соломатовым [38] для решения бетоноведческих задач. Базируясь на этой методологической основе, была проведена последовательная оптимизация структуры и свойств ВФСУБ на микро-, мезо- и макроструктурном уровнях (реологические матрицы 1, 2 и 3-го уровня (рода) соответственно). Матрица 1-го уровня включает цемент, молотый кварцевый песок (каменная мука) и иные порошковые добавки, микрокремнезем (или аналог), пластификатор (и/или другие водорастворимые добавки) и воду затворения; матрица 2-го уровня (мезоструктура) состоит из матрицы 1-го уровня и тонкого песка; матрица 3-го уровня (растворная часть бетона) состоит из матрицы 2-го уровня и песка средних или крупных фракций (каменный отсев) (классификация по Калашникову В.И.) [79].

На начальном этапе разработки составов осуществляли оптимизацию микроструктуры (1 уровень) по иерархии главных критериев, приведенных в первой главе (таблица 10). В результате получены зависимости, описывающие характер влияния рецептурно-технологических факторов на важнейшие свойства в заданной области экспериментального пространства. Анализ данных позволил провести оптимизацию разрабатываемых составов на уровне микроструктуры и подготовить переход на следующий масштабный уровень.

Макроструктура (2 уровень) ВФСУБ формировалась в результате добавления нового рецептурного фактора – нано- и микроразмерных дисперсных компонентов (0,01–10 мкм) в виде микрокремнезёма, высокоактивного метакаолина или микрокальцита. В качестве базового варианта упрочняющего наполнителя применялся микрокремнезем – высокореакционный пуццолан (SiO_2 в виде коэсита), частицы которого окружают зерна цемента, уплотняя и упрочняя цементный гель, за счет заполнения пустот прочными продуктами гидратации и повышения сцепления с заполнителями, присутствующими в матрицах следующих масштабных уровней.

Модифицирование рецептур составов при оптимизации ВФСУБ осуществлялось усложнением компонентного состава матрицы 1-го уровня, введением водорастворимых

добавок-компенсаторов усадки в воду затворения. Далее с учетом положений законов створа и конгруэнтности, разработанных проф. Рыбьевым И.А. в теории искусственных строительных материалов, принимался принцип проектирования гетерогенных составов, устанавливающий, что оптимальное сочетание свойств, достигнутое в матрице 1-го масштабного уровня, транслируется на аналогичное улучшение показателей всех последующих матриц, определяющих конечную структуру ВФСУБ.

2.4 Планирование эксперимента и математическая обработка результатов

2.4.1 Методы математического планирования эксперимента

При подборе состава многокомпонентных систем, разработке технологии их изготовления, а также оптимизации составов по физико-механическим и эксплуатационным свойствам, использовали методы математического планирования эксперимента. В качестве матрицы планирования эксперимента были выбраны симплекс-решетчатый план Шеффе и композиционный план второго порядка, рекомендуемые для этих целей в специализированной научной литературе [80].

Вычисление коэффициентов уравнения регрессии, их статистический анализ и проверку адекватности полученных моделей проводили с помощью программного комплекса «Градиент», разработанного в ПГУАС.

С целью установления пределов варьирования рецептурных факторов проводили реперные эксперименты, позволяющие значительно сузить область исследуемого экспериментального пространства.

Оценку погрешности в измерениях проводили с использованием стандартного отклонения S_x , значение которого рассчитывали по формуле:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (24)$$

где $\bar{x}$ – среднее значение в n измерениях;

x_i – значение параметра в i -ом опыте;

n – общее количество проведенных измерений.

ГЛАВА 3. Разработка составов высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов

3.1 Прогнозирование диссипативных свойств цементных композитов

На первом этапе прогнозирование диссипативных свойств гетерогенных цементных композитов, имеющих в структуре различные по природе и плотности включения, производилось посредством численного эксперимента на модельных системах. Модели представляли собой малогабаритные балки с заданными характеристиками трех фаз: растворной матрицы, частиц заполнителя и межфазной переходной зоны. Растворная матрица формировалась в результате затвердевания смеси из цемента, воды, воздуха и заполнителей диаметром менее 10 мм. С целью оценки влияния жесткости межфазной переходной зоны на формирование демпфирующих показателей бетона в ряде составов заполнители диаметром от 5 до 10 мм, были предварительно покрыты слоем силикона со средней толщиной слоя 0,5 мм. Для покрытия использовался силикон с твердостью по Шору 60 единиц (шкала А) и истинной плотностью 1220 кг/м³ и с динамическим модулем упругости 1,5 МПа. Для оценки влияния плотности заполнителей – произведено частичное замещение (до 5 %) минеральных заполнителей на стальные шарики аналогичного размера (рисунок 20).

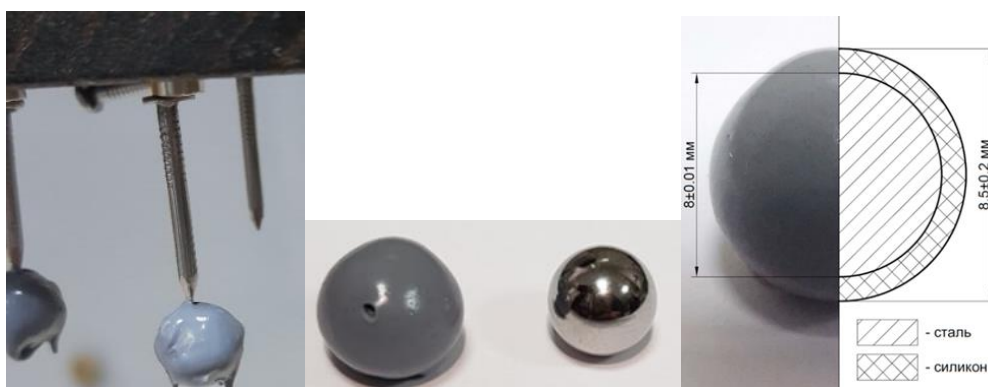


Рисунок 20 – Процесс изготовления и схема заполнителей-демпферов

Общая объемная доля частиц 5 до 10 мм оставалась неизменной на уровне 30 %. Вследствие эластичности полимерное покрытие формирует своеобразную рессору (рисунок 21), позволяющую частице заполнителя перемещаться при циклическом нагружении без жесткой связи с цементно-песчаной матрицей бетона. Колебание центра тяжести заполнителя, не совпадая с перемещениями образца, создаёт восстанавливающую силу, подавляющую вибрацию, т.е. такой заполнитель работает аналогично инерцион-

ному демпферу [81]. Собственная частота заполнителя с эластичным покрытием оценивалась по результатам 3D-моделирования (рисунок 21), а также по результатам расчета по формуле (25) [82]:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2} \frac{E_{\Pi}}{R_3 \rho_3 \delta_{\Pi}}}, \quad (25)$$

где E_{Π} – модуль упругости материала покрытия;

δ_{Π} – толщина покрытия;

R_3 – радиус заполнителя;

ρ_3 – плотность материала заполнителя.

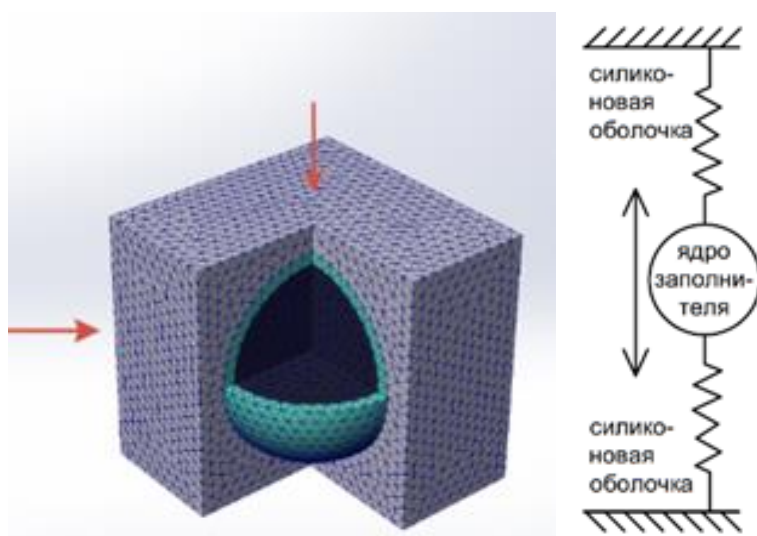


Рисунок 21 – Численная модель структуры бетона и движение модифицированных силиконом частиц заполнителя под нагрузкой

Механические свойства материалов, используемых в анализе, приведены в таблице 13. Геометрические параметры заполнителей – в таблице 14.

Таблица 13 – Механические свойства материалов

Компонент	Материал	Плотность (кг/м ³)	E (ГПа)
Сердечник			
К1	Нержавеющая сталь (ШХ15)	7725	210
К2	Дробь стальная	7410	200
К3	Гранит	2410–2590	49
К4	ТФ-10	4800–5300	54,2
Покрытие	Силикон	1200–1300	0,00024–0,00035
Куб	Бетон	2400–2500	38

Таблица 14 – Геометрические параметры включения-демпфера

Конфигурация	Ядро заполнителя		Силиконовое покрытие	Ядро заполнителя + силиконовое покрытие		Результат анализа по формуле (25) f_1 , Гц
	Диаметр, см	Масса, г	δ_n	Диаметр, см	Масса, г	
K1	0,8	2,07	0,1	1	2,417	543,5
K2	0,55	0,645	0,12	0,79	0,87	611,1
K3	0,593	0,26	0,081	0,755	0,415	1263,1
K4	0,59	0,516	0,178	0,945	0,952	602,6

Анализ данных таблицы 14 показывает, что увеличение толщины эластичного покрытия (0,081–0,178 мм) и повышение плотности (2410–7725 кг/м³) материала-сердечника в составе инерциального демпфера, сопровождается двухкратным изменением собственной частоты модифицированного заполнителя. Это обосновывает эффективность применения способа покрытия заполнителя эластичным материалом для решения задач в рамках регулирования вибродемпфирующих показателей ВФСУБ.

Перейдем к гетерогенной модели со стохастическим распределением заполнителей-демпферов в объеме материала. Для исследования вопроса эффективности инерционного демпфера при его инкорпорировании в бетон, был поставлен эксперимент на образцах-балочках, испытываемых по методу свободных колебаний (рисунок 22).

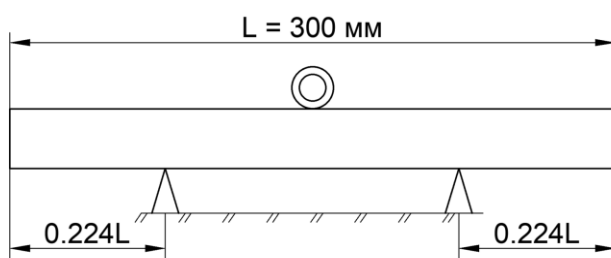


Рисунок 22 – Модельная система с двумя инерционными демпферами

При составлении условий численных моделей исходили из возможностей оборудования и специфики процесса снятия данных. В таблице 15 приведены основные параметры для моделирования и экспериментальной проверки.

При проведении эксперимента исходили из равенства собственных частот частиц заполнителя-демпфера одной фракции. Согласно работе [83] оптимум коэффициента затухания колебаний рассматриваемой системы достигается при условии

$$k_{opt} = \frac{1}{1+\mu} < 1, \quad (26)$$

$$\mu = \frac{m_d}{m_s};$$

где m_d (f_d) и m_s (f_s) – собственные массы (частоты) включения-демпфера и всего образца соответственно.

Таблица 15 – Параметры бетонного образца-балки для случая с двумя включениями-демпферами

Описание	Длина, см	Сечение ($b \times h$), см	Масса, г	Объем, см ³	Первая собственная частота балки (эксперимент)
Стальные шарики с покрытием	30	3,96×2,8	772,9	332,6	1348,3
То же без покрытия	30	3,96×2,8	772,3	332,6	1349,7
Без утяжелителей	30	3,96×2,8	768,2	332,6	1357,1

При заданной величине (μ) оптимальное отношение частот определяется по условию [84]:

$$k = \frac{f_d}{f_s} \text{ (при } k \rightarrow k_{\text{opt}}). \quad (27)$$

Исходные данные и расчет k_{opt} включений и основного материала приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Расчет элементов включений демпферов

Основная масса			Демпфер			Расчетные параметры		
Балка ($l \times b \times h$)	m_s^*	f_s	тип	m_d	f_d	% m_d	k	k_{opt}
300×27,4×19,35	91,6	450	K1 (2 шт.)	4,834	543	0,05	1,21	0,95
			K1 (3 шт.)	7,251		0,08		0,93
			K1 (6 шт.)	14,50		0,16		0,86

*Согласно [54] эффективная масса образца-балки в первой моде составляет 1/4 от общей массы.

Расчетные данные в таблице 16 получены по уравнениям (26) и (27). Видно, что для рассматриваемого случая использование двух инерционных демпферов обеспечивает лучшее совпадение частот (f_d и f_s).

В экспериментальной части исследовали образец-балочку, в средней части которой (по верхней грани) фиксировали при помощи клейкой ленты два–шесть инерционных

демпферов (стальные шарики и шарики, покрытые силиконом). Результаты экспериментов показаны на рисунке 23.

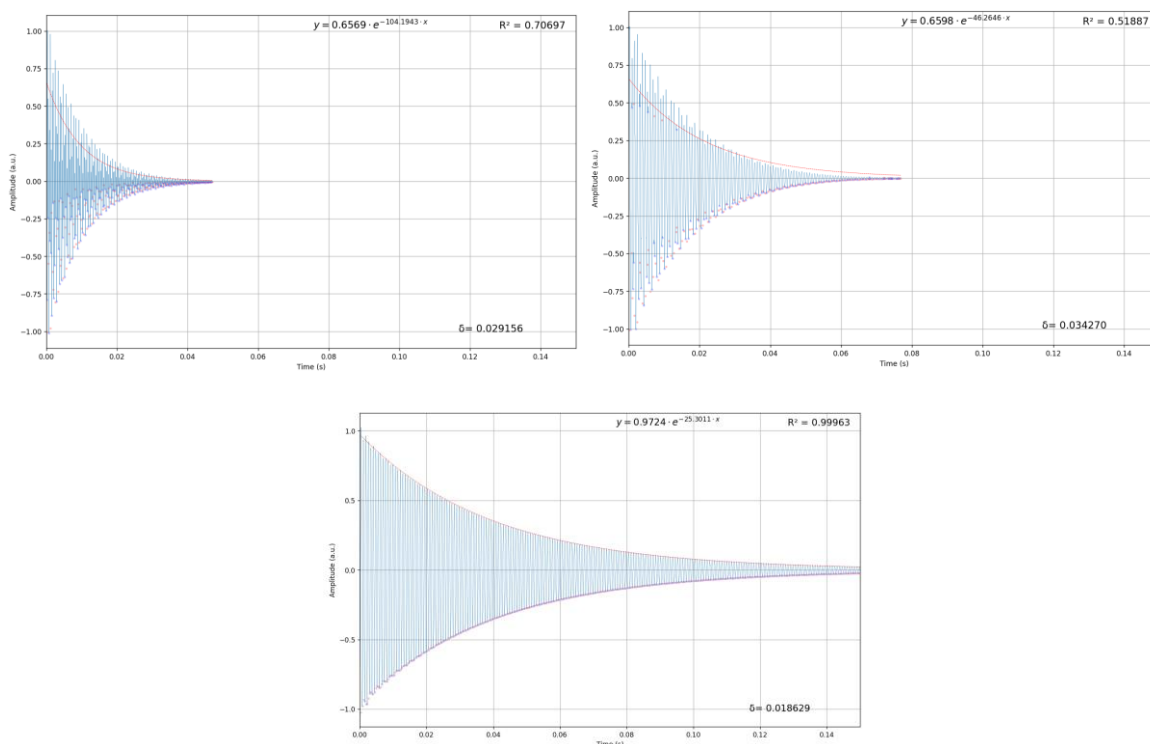


Рисунок 23 – График свободных колебаний контрольных образцов с закреплёнными инерционными демпферами: а – шесть стальных шариков с силиконовым покрытием; б – три стальных шарика с силиконовым покрытием; в – контрольный образец без инерционных демпферов

Данные графиков показывают, что при количестве инерционных демпферов от трех до шести наблюдается значительное падение амплитуды колебаний образца с течением времени. Фурье-анализ затухающего сигнала выявил наличие двух доминирующих частот в его спектре, что нехарактерно для стандартных образцов бетона и не позволяет достоверно определить логарифмический декремент.

Для более тонкого анализа и количественного определения величины логарифмического декремента затухания δ количество закрепленных демпферов было уменьшено до двух. Результаты, полученные для этого случая, показаны на рисунке 24.

Результаты испытаний образцов бетона с хаотичным распределением заполнителей-демпферов в объеме материала показаны на рисунке 25. В качестве контрольных использовались образцы-балочки 28×40×300 мм. Определение вибродинамических характеристик проводилось методом свободных колебаний.

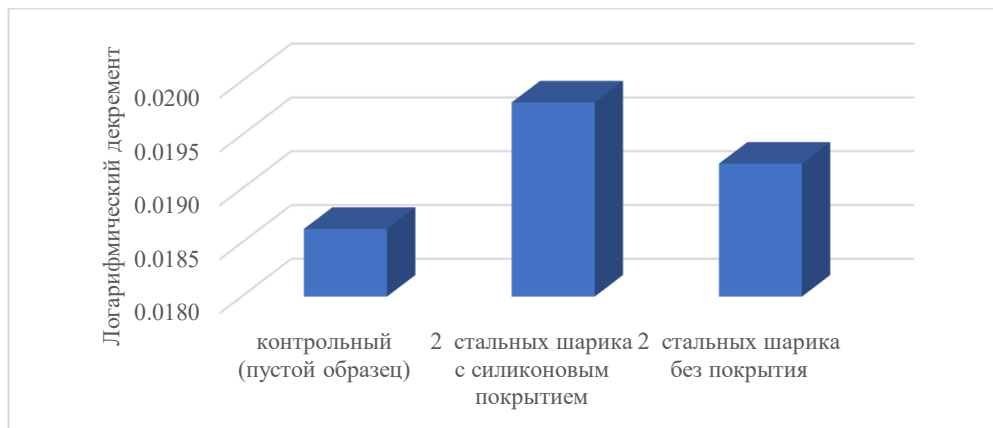


Рисунок 24 – Влияние двух инерционных демпферов на логарифмический декремент колебаний бетонного образца-балочки

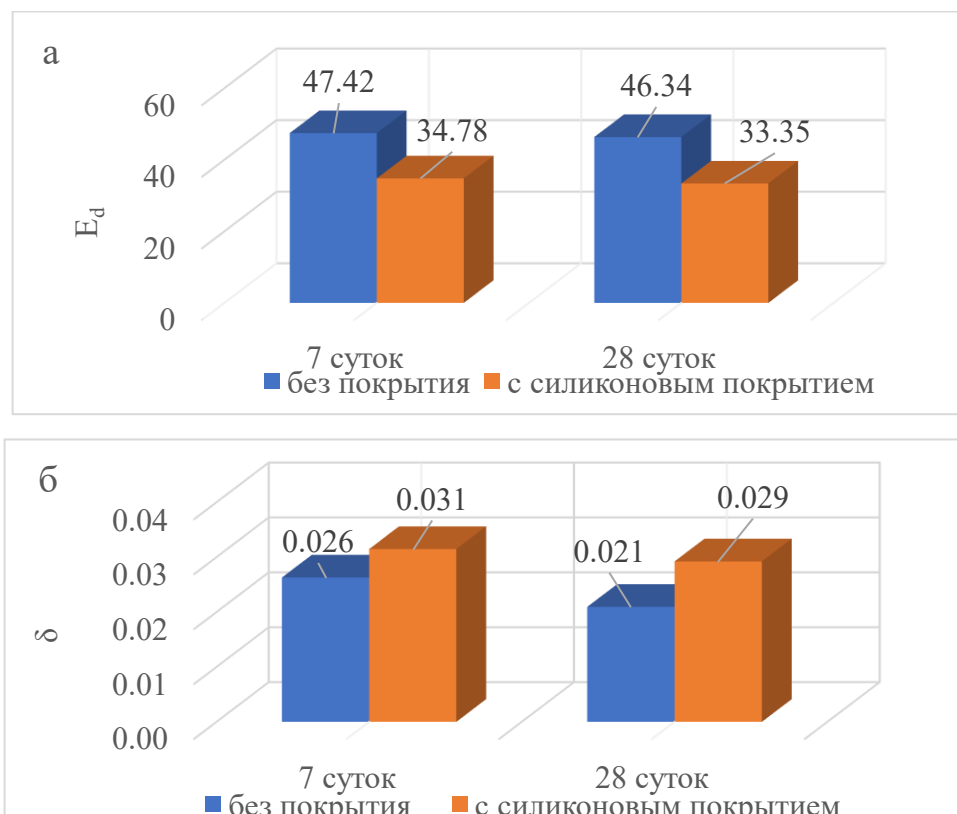


Рисунок 25 – Результаты определения динамических характеристик бетона:

а – модуль упругости; б – логарифмический декремент

Установлено снижение динамического модуля упругости в 1,36–1,39 раза при покрытии стальных шариков-заполнителей силиконом (рисунок 25). Данное соотношение практически не меняется при твердении бетона. Величина демпфирования при этом повышается в 1,19 раза (в возрасте 7 суток) и в 1,38 раза (28 суток).

3.1.1 Феноменологическое описание закономерностей влияния рецептурно-технологических факторов на процессы структурообразования, определяющие формирование структурозависимых вибродинамических свойств

Исследование влияния материала растворной матрицы на вибродинамические характеристики образцов-балочек из бетона.

В составе цементного камня выделяются следующие составляющие, потенциально влияющие на формирование структурно-зависимых, в том числе вибродемпфирующих свойств:

- кристаллический каркас, сформированный гидросиликатами кальция, гидроксидом кальция, гидроалюминатами и гидроферритами кальция, а также их сульфатсодержащими фазами (эттрингит);
- цементный (тоберморитовый) гель, в котором дисперсной фазой являются субмикрорекристаллы гидросиликатов кальция;
- негидратированные зерна клинкера;
- поровое пространство.

С учетом влияния на свойства поровое пространство подразделяется на отдельные масштабные уровни [85]:

- гелевые с радиусом менее 5 нм;
- микрокапиллярные или переходные поры с радиусом 5–100 нм;
- макропоры более 100 нм.

В гелевых порах вода находится под действием молекулярных поверхностных сил, изменяющих ее физико-механические свойства. С повышением степени гидрофильности поверхности пор увеличивается количество активных центров адсорбции, определяющих величину силового поля притяжения молекул воды, т.е. образуется более плотный и упорядоченный слой. С ростом химической активности минералов цементной подложки плотность воды адсорбированного слоя увеличивается и может превышать (1200 ± 10) кг/м³. Слой связанной воды обладает ортотропностью: параллельно твердой поверхности ее свойства не изменяются, а в перпендикулярном – приобретают качества псевдотвердого тела с прочностью при сдвиге около 10^4 Па. Таким образом, ортотропность свойств адсорбированной воды влияет на процессы формирования свойств цементного камня, включая его вибродинамические характеристики, улучшая взаимное

проскальзывание в контактных зонах. Наличие молекул ПАВ в воде затворения изменяет характер протекающих процессов за счет уменьшения величины поверхностного натяжения в зоне раздела твердой и жидкой фаз и поверхностной энергии частиц, являющейся движущей силой механизма адсорбции.

Изменение соотношений между структурными элементами позволяет в широком диапазоне влиять на свойства цементного камня. Известно, что введение модификаторов и активных минеральных добавок относится к числу химико-технологических факторов, существенно изменяющих фазовый состав и морфологию новообразований затвердевшей цементной матрицы.

Цементный камень – это материал с жесткими структурными связями, в котором диссипация вибрационной нагрузки реализуется путем макроскопического проскальзывания поверхностей в контактной зоне. Очевидно, что под воздействием вибрации в гетерогенном материале возникают упругие волны различной частоты, а их распространение по объему осложняется процессами деструктивной интерференции, когда они, перекрываясь не по фазе, генерируют результирующую с меньшей амплитудой, в результате демпфирующая способность системы возрастает.

Исходя из представлений о механизме формирования диссипативных показателей цементного камня, их повышение может быть достигнуто подбором рецептурно-технологических факторов, способствующих созданию новообразований, заметно отличающихся по параметрам геометрии и плотности.

Рассмотрение влияния параметров микроструктуры цементного камня на вибродинамические свойства невозможно без анализа существующих представлений о структурных особенностях затвердевшего микроконгломерата.

Затвердевший цементный камень в возрасте 28 сут. содержит порядка 50–60 % гидросиликатного геля от объема твердой фазы, 20–25 % Ca(OH)_2 , 15–20 % гидросульфоалюминатов (ферритов) кальция. Согласно [86] цементный камень представляет собой сложную минеральную систему, возникновение отдельных структурных элементов которой разнесено по времени твердения, что затрудняет формирование бездефектного трехмерного кристаллического каркаса: в его объеме распределено большое число индивидуальных кристаллов, а также закономерных и стохастических кристаллических сростков, объединенных относительно более пластичным веществом – гидросиликатным гелем [87]. Затвердевший цемент можно представить, в виде композита, состоящего

из гелеобразной матрицы, дисперсно армированной агрегированной кристаллической фазой и порового пространства. Слабозакристаллизованные гидросиликаты выполняют функцию связующего вещества, цементирующего негидратированные ядра клинкера и сравнительно крупные кристаллы гидратов: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (до 15–25 мкм), этtringит (5–80 мкм). С точки зрения формирования демпфирующих свойств наличие механически более податливой объединяющей фазы в виде гидросиликатного геля (C–S–H) позволяет рассматривать такие системы как своеобразный инерционный демпфер (рисунок 26).

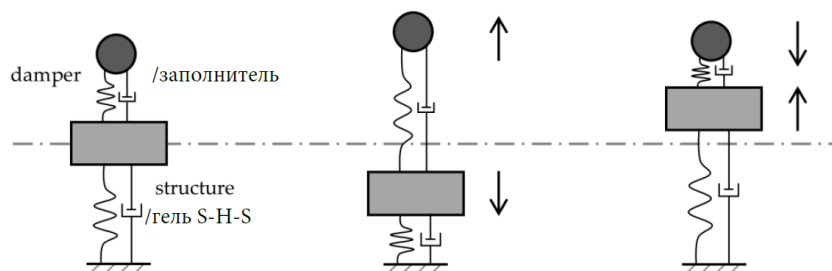


Рисунок 26 – Схема работы инерционного демпфера в структуре цементного камня

Согласно последним данным размеры наименьших устойчивых структурных элементов твердой фазы гидросиликатного геля находятся в пределах от 4 до 6 нм [88]. При этом выделяют два типа геля: C-S-H высокой плотности (C-S-H_{вп}) и C-S-H низкой плотности (C-S-H_{нп}) (рисунок 27), которые относят к внутреннему и внешнему продукту гидратации соответственно.

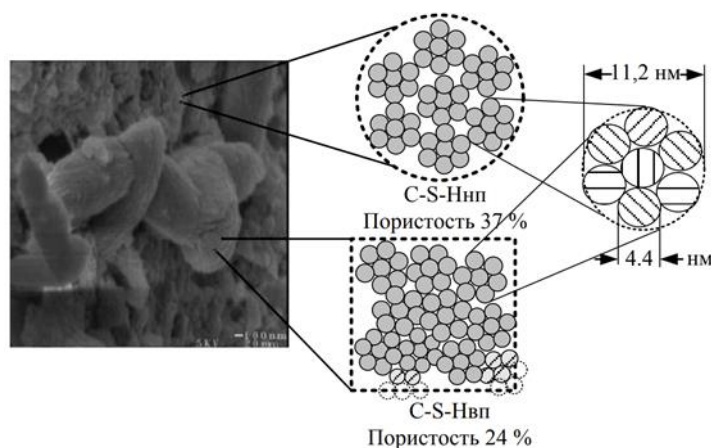


Рисунок 27 – Различия между C-S-H внутреннего и внешнего слоя гидратации [88]

В отличие от C-S-H кристаллы этtringита ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) имеют игольчатую или призматическую форму и образуются в межзерновом пространстве вблизи поверхности зерен C_3A . Их размер колеблется в диапазоне 5–80 мкм и зависит от условий протекания процесса гидратации, а плотность составляет $\rho = (1730 \pm 10) \text{ кг/м}^3$. Вводя в состав бетона гидравлические добавки и, понижая тем самым концентрацию

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ в поровом пространстве, можно регулировать вид кристаллических новообразований. Например, в среде с пониженной pH, кристаллы этtringита замещаются моносульфатной формой гидросульфoалюмината ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), плотность которых достигает $(1950 \pm 10) \text{ кг/м}^3$.

Влияние минерально-фазового состава на вибродинамические показатели бетонов исследовали на примере этtringитовой фазы. Такой подход продиктован проблемой усадочных деформаций бетонов, актуальной для высокопрочных составов с повышенным расходом цемента. Известный способ снижения усадки основан на формировании развитой этtringитовой фазы в структуре твердеющего цемента [89]. Это объясняется особенностью процесса образования кристаллов этtringита, способствующего их прорастианию в свободном поровом пространстве цементного камня и препятствующего распространению усадочных трещин. В работе [90] показано, что наличие равномерно распределенных и относительно крупных кристаллогидратов увеличивает прочность затвердевшего бетона на изгиб.

Сульфатосодержащим компонентом в составе смеси являлась промышленная добавка Denka CSA, разработанная для обеспечения размерной стабильности бетонных конструкций. Она компенсирует усадочные напряжения путем образования этtringита за счет присоединения значительного количества химически связанной воды. Помимо этого, введение Denka CSA уменьшает экзотермию гидратации и повышает трещиностойкость цементного камня [70].

Исследование влияния микрокремнезема и сульфатосодержащей расширяющейся добавки в присутствии карбоксилатного пластификатора (Melflux 1641F) на минерально-фазовый состав цементного камня было проведено в РХТУ имени Д. И. Менделеева [89]. Установлено, что после 28 суток твердения морфология продуктов гидратации имеет существенные различия (рисунок 28):

- в цементе без минеральных добавок образуются крупные пластинки портландита, а этtringит растет в порах беспорядочно;
- введение добавки микрокремнезема сопровождается укрупнением пластинок гидроалюминатов кальция и подавлением роста кристаллов этtringита;
- в образцах с расширяющейся добавкой много столбчатых и нитевидных кристаллов этtringита, заполняющих поры и пространство между другими продуктами гидратации (рисунок 28, в).

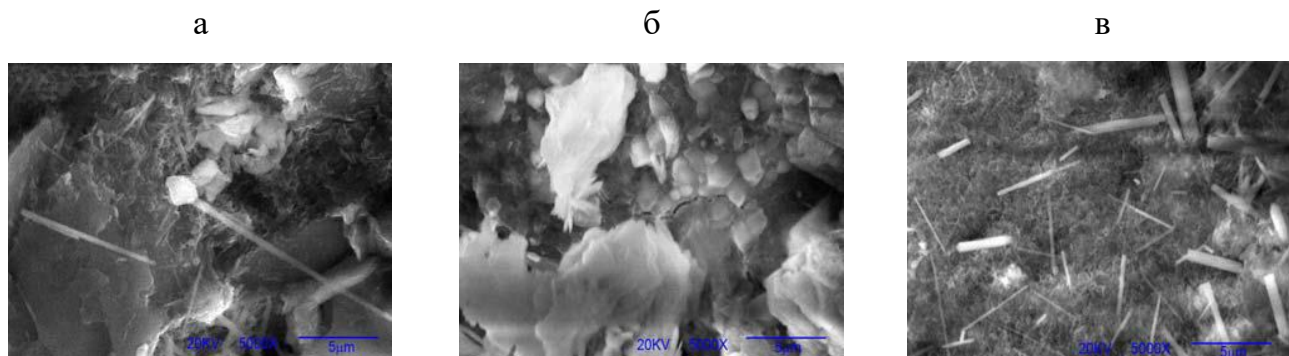


Рисунок 28 – Влияние сульфатосодержащей добавки и карбоксилатного пластификатора на микроструктуру цементного камня (по данным [89]):

а) контрольный (без добавок); б) с добавкой МК; в) с добавлением САК, ув.×1000

На рисунке 29 приведен РФА образцов цементного камня после 28 суток твердения (н.у.) с различным содержанием сульфоалюминатного компонента (САК).

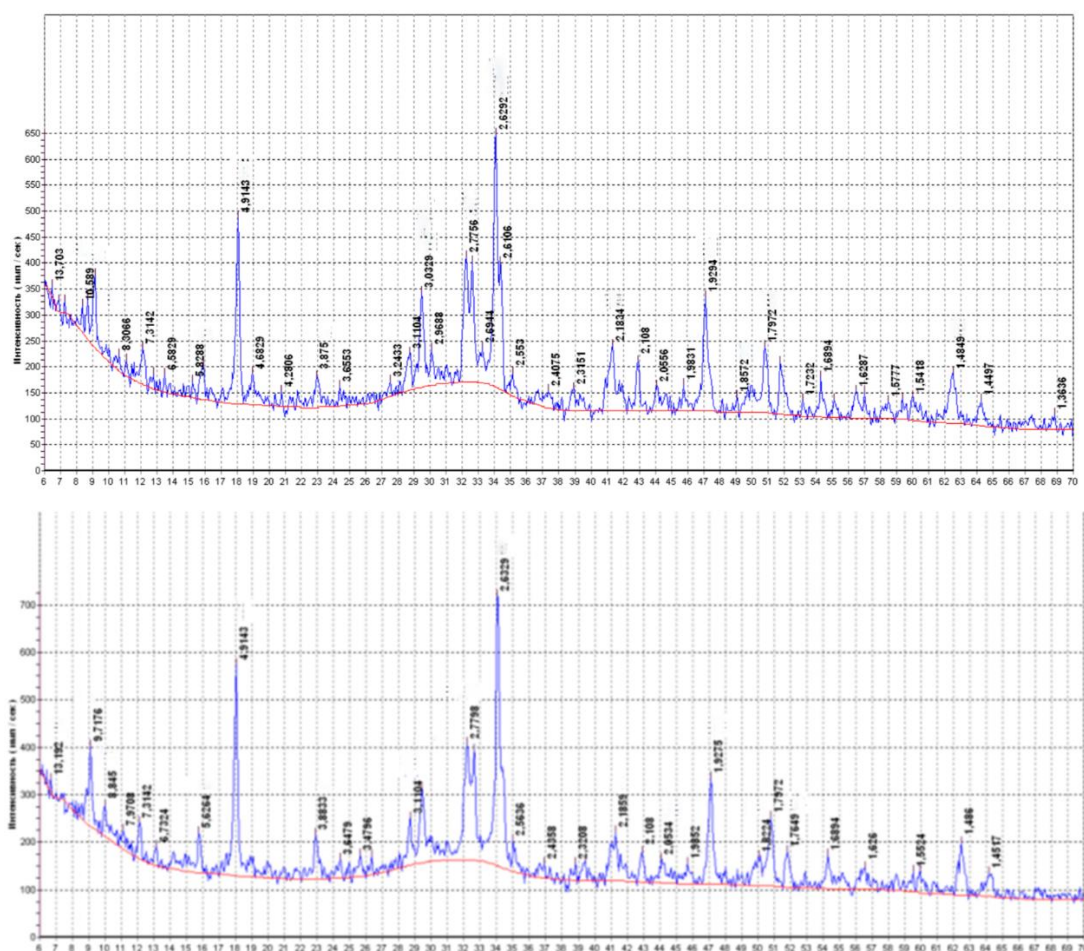


Рисунок 29 – Рентгенограмма цементного камня с добавкой САК:

1% (верхний); 5% (нижний)

Увеличение добавки САК сопровождается ростом интенсивности дифракционных пиков этtringита ($d=9,72$; $5,60$; $4,65$ Å) и низкоосновных гидросиликатов кальция ($d=10-14$ Å).

Методом ДТА в образцах обнаружены эндоэффекты при 90–160 и 520–600 °С, которые подтверждают наличие этtringита и гидросиликатов кальция (рисунок 30).

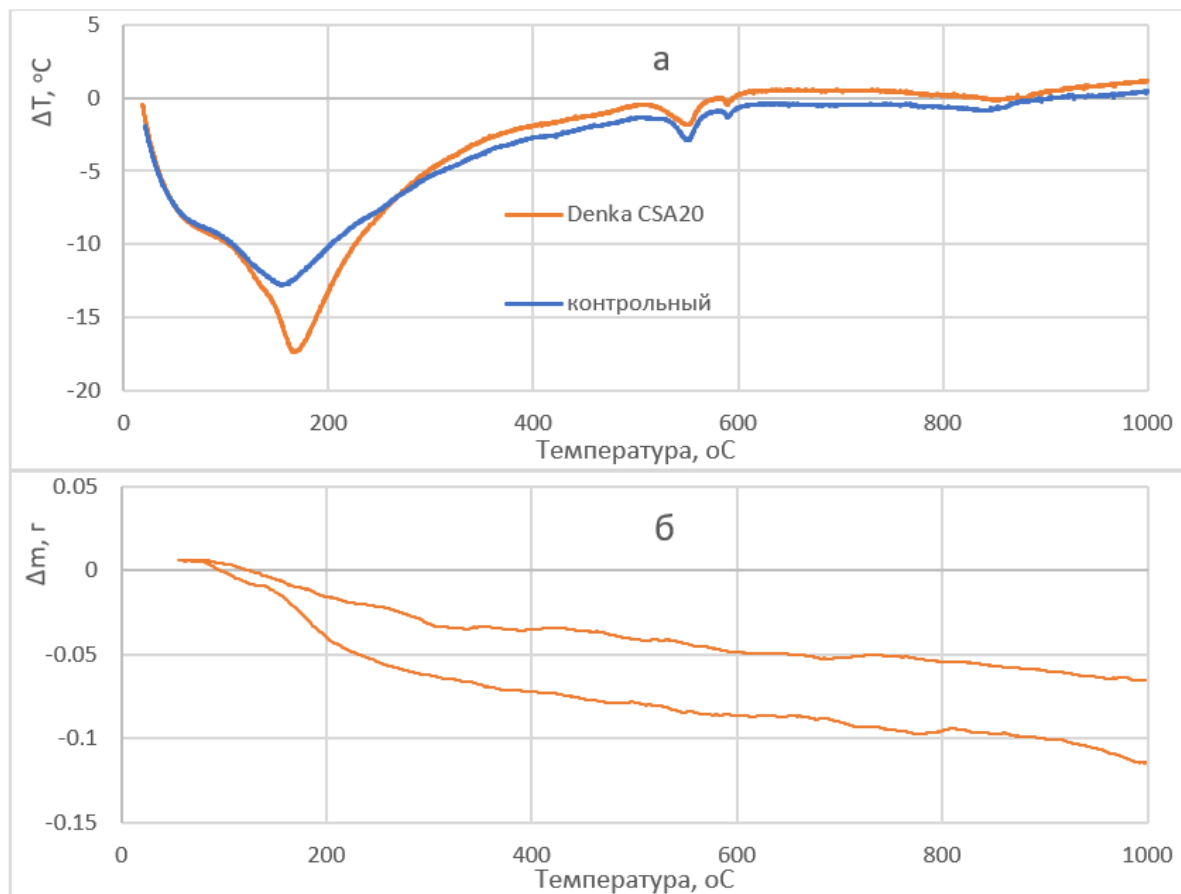


Рисунок 30 – Результаты дериватографии мелкозернистого бетона с добавкой Denka CSA20: а – дифференциально-термический анализ; б – термогравиметрия

Индивидуальное влияние карбоксилатных пластификаторов (без расширяющих добавок) на формирование этtringитовой фазы изучалось многими исследователями. В работах [90] указывается на интенсификацию процесса образования этtringита при введении 0,7 % Ц гиперпластификатора на поликарбоксилатной основе (на примере MasterGlenium ACE 430), результатом которого является образование вытянутых призматических кристаллов до 5 мкм. При этом наблюдалось активное заполнение порового пространства и кольматирование микротрещин и пор, увеличивающее плотность и прочность цементного камня (рисунок 31).

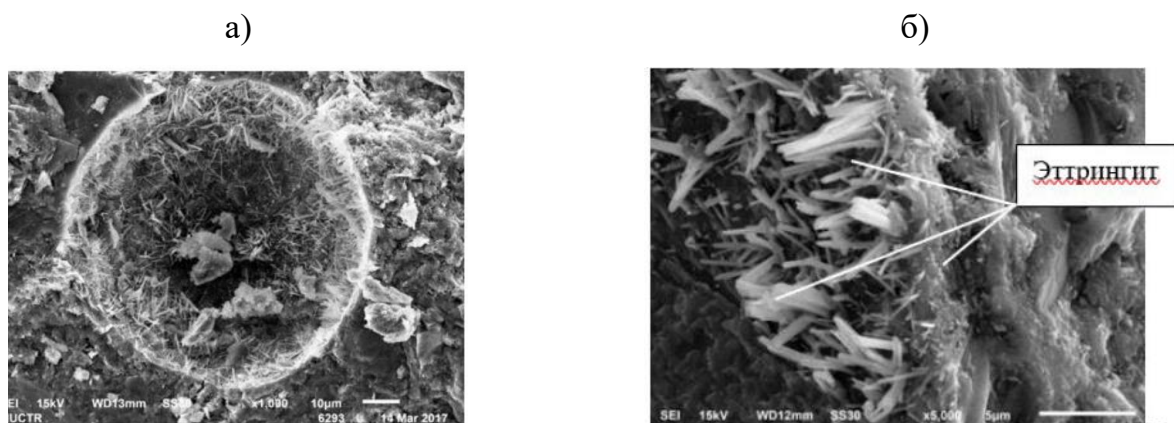


Рисунок 31 – Структура цементного камня с гиперпластификатором при увеличении:

а) $\times 15000$; б) $\times 1000$ [90]

Таким образом, путём введения в состав минеральной добавки и пластификатора реализуется способ эффективного управления процессами формирования минерально-фазового состава и морфологии продуктов гидратации трехкальцевого алюмината в аспекте улучшения вибродинамических показателей бетонов.

3.1.2 Разработка авторской методики и инструментария для экспериментальной оценки диссипативных свойств цементных композитов

Анализ опубликованных работ, приведенный в главе 1, показывает, что имеется потребность в совершенствовании методик и лабораторной базы для исследования вибродинамических свойств гетерогенных строительных материалов.

Усовершенствованное оборудование необходимо для проведения экспериментальных исследований в рамках создания и оптимизации рецептур ВФСУБ с заданными показателями вибродинамических свойств, которые, наряду с модулем упругости и деформациями усадки (ползучести), были выделены ранее в качестве наиболее значимых критериев качества (см. главу 1).

Проблематика специфики эксплуатации бетона в условиях динамического нагружения рассматривалась с учетом результатов опубликованных работ [91 – 93]. В большинстве публикаций исследуется ударное или низкочастотное периодическое воздействие [91, 94, 95], некоторые из них посвящены вопросам распространения в бетоне высокочастотных [96] и ультразвуковых колебаний [97, 98].

Собственные расчеты, проведенные по справочным данным [99, 100], указывают на значительную долю частот вибраций промышленных конструкций в диапазоне 100–

1000 Гц. При этом работа технологического оборудования и большинства типов металлообрабатывающих станков сопровождается частотой вибраций в диапазоне 60–800 Гц. Учитывая вышеизложенное, проектирование экспериментальной установки велось с условием возможности генерации колебаний и корректной фиксации отклика образцов в частотном диапазоне 0–1000 Гц.

Конфигурацию и условия закрепления образцов подбирали расчётно-экспериментальным путём, чтобы резонансная частота располагалась в середине указанного выше диапазона. Исследование проводилось на балочках размерами $300 \times 19 \times 28$ ($l \times h \times b$) мм и включало область структурных матриц 1-го, 2-го и 3-го уровней (цементный камень-мелкозернистый бетон).

Существует два различных методологических подхода к изучению вибродинамических свойств материалов: исследование затухающих [101 – 105] и вынужденных колебаний (резонансный) [96, 106 – 108]. Метод вынужденных колебаний более информативный: определение динамического модуля упругости и демпфирующих характеристик дополнено опцией фиксации их изменений после продолжительного воздействия, что позволяет оценить вибростойкость материала.

Экспериментальные исследования вибродинамических свойств бетонов проводили на установке, разработанной и усовершенствованной с учетом особенностей, выявленных в ходе испытаний мезомodelей – образцов-балочек длиной 300 мм – гетерогенных строительных материалов. Последовательность этапов проведения вибродинамических испытаний показана на рисунке 32.

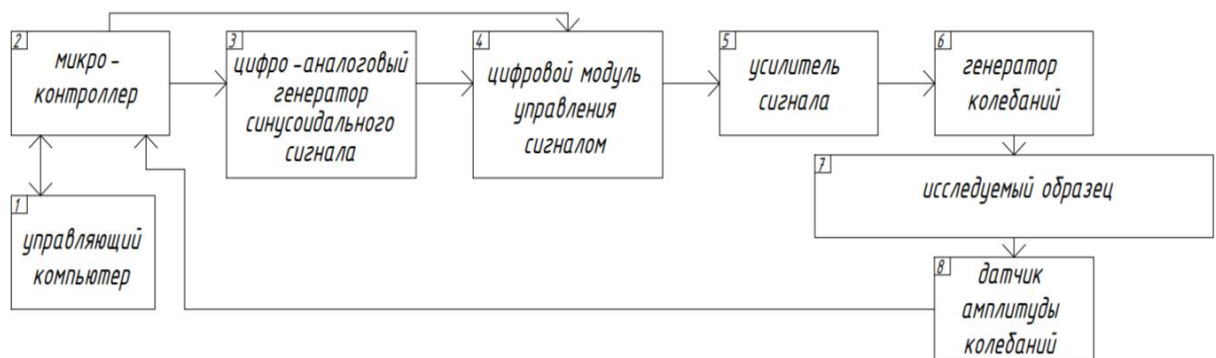


Рисунок 32 – Схема проведения вибродинамических испытаний методом вынужденных колебаний

Основу устройства составляет микроконтроллер ESP32 (2), соединённый с управляющим компьютером (1) через последовательный порт. К запрограммированному мик-

роконтроллеру посредством интерфейса SPI подключен модуль генератора синусоидального сигнала заданной частоты на базе микросхемы AD9833 (3), на котором автоматически задаются необходимая частота и форма сигнала. Амплитуда выходного сигнала регулируется микроконтроллером через цифровой делитель напряжения X9C103S (4) в зависимости от целей исследования и виброотклика испытуемого образца (7). В случае использования усилителя с цифровым управлением степенью усиления делитель напряжения не используется. Аналоговый сигнал заданной амплитуды передаётся на усилитель (5) и затем подаётся на генератор колебаний.

С учетом сложности исследовательских задач опробованы все технически доступные методы создания вынужденных колебаний:

- электромеханический на основе виброгенератора;
- электромагнитный на базе электромагнита и стальной пластины, приклеенной к образцу;
- акустический с помощью источника звуковых волн.

Работа устройства происходит следующим образом. Сначала колебания образца регистрируются датчиком, данные с которого передаются на микроконтроллер для математических преобразований и вычислений. На следующем этапе систематизированные результаты поступают на основной компьютер. Датчик измерения параметров вибрации выбирался, исходя из регистрируемого диапазона частот. При частотах до 1000 Гц использовался MEMS-акселерометр. Его преимущество – прямое вычисление виброперемещения и виброскорости гармонически колеблющейся точки на поверхности образца по данным её максимального ускорения без калибровки датчика. Виброперемещение (S) определялось по уравнению:

$$S = \frac{A}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2}, \quad (28)$$

где A – виброускорение в м/с^2 ;

f – частота в Гц.

Виброскорость (V , м/с) вычислялась по формуле:

$$V = 2 \cdot S \cdot \pi \cdot f, \quad (29)$$

где S – виброперемещение, м .

В исследованиях вибродинамических свойств материалов при поперечных колебаниях свободное размещение образца-балки на опорах [96, 102, 106] применяется наряду

с консольным закреплением образцов [101, 105, 108, 109]. На этапе выбора наиболее подходящей сначала была апробирована консольная схема (рисунок 33).

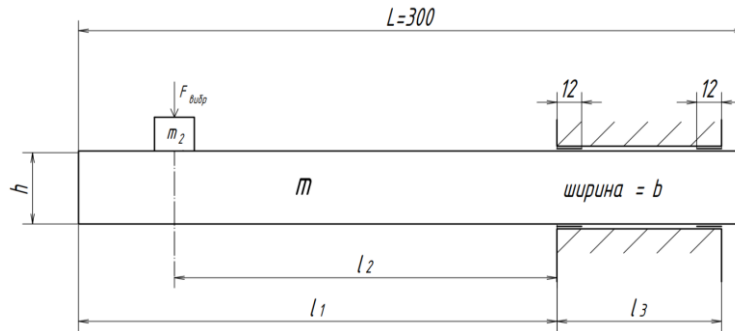


Рисунок 33 – Схема испытаний методом вынужденных колебаний (консольное закрепление)

Зажим образца осуществлялся в двух зонах, что обусловлено пониженными требованиями к точности геометрии образца в сравнении с зажимами на базе плоскопараллельных пластин. На рисунке 34 приведена схема разработанной установки. Станина изготовлена из ВФСУБ ($R_{сж}=80$ МПа), что позволило снизить ее себестоимость и трудоемкость. Технические характеристики: масса 22,6 кг; максимальное сечение контрольного образца 42×42 мм; длина зажима (l_3) 80/110 мм; момент затяжки винтов зажима 7 Н·м (рисунок 35).

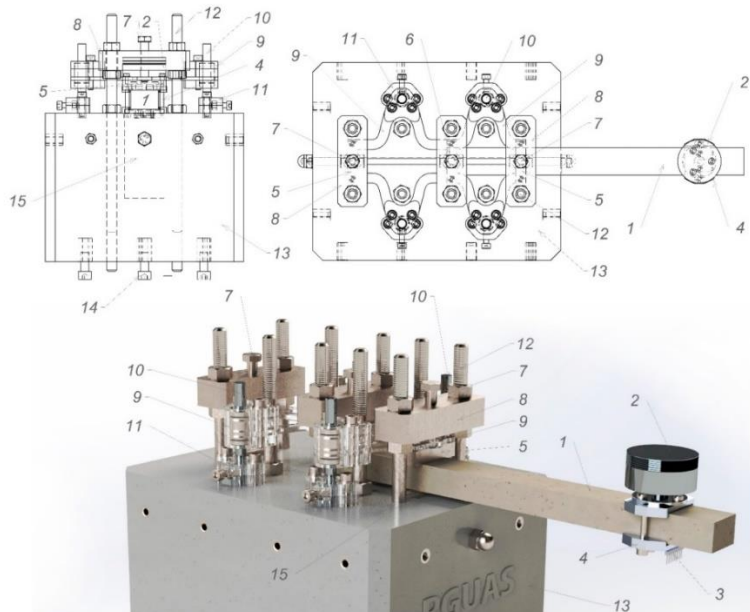


Рисунок 34 – Схема установки для вибродинамических испытаний: 1 – образец; 2 – виброгенератор; 3 – акселерометр; 4 – крепление; 5 – передняя прижимная губка; 6 – задняя прижимная губка; 7 – зажимной винт; 8 – траверса; 9 – позиционирующая пластина; 10 – направляющая; 11 – опора направляющей; 12 – крепежная штанга; 13 – бетонная станина; 14 – регулируемая опора; 15 – нижняя опорная губка

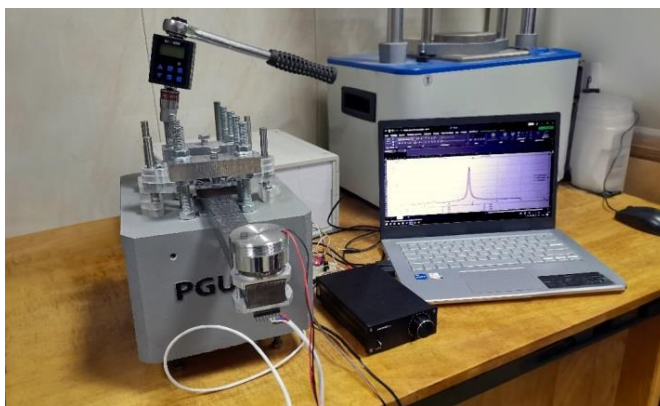


Рисунок 35 – Общий вид лабораторного комплекса для вибродинамических испытаний строительных материалов

Акселерометр и виброгенератор крепятся к образцу посредством двух крепежных пластин, стягиваемых винтами (рисунок 36). Такое конструктивное решение позволило значительно ускорить проведение эксперимента. Кроме того, отсутствует необходимость приклеивания деталей на образец, что позволяет испытывать влаго- и маслосыщенные образцы.

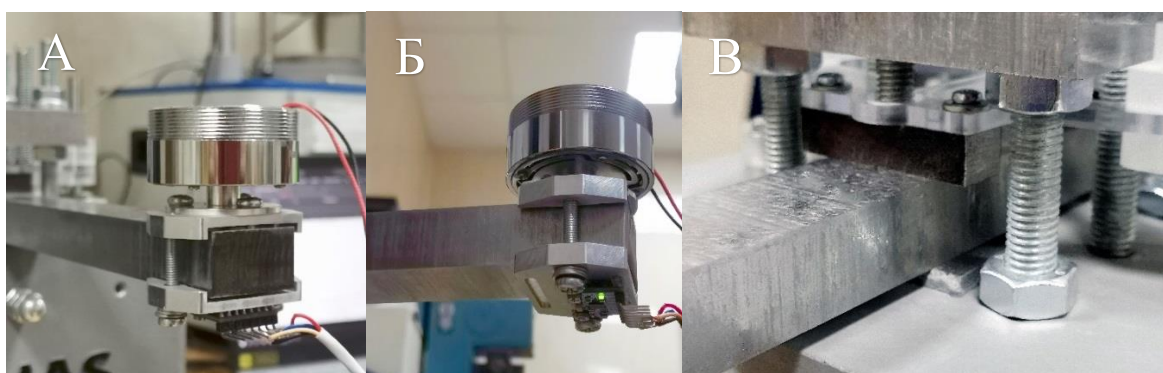


Рисунок 36 – Лабораторный комплекс для вибродинамических испытаний:

А, Б – закрепление виброгенератора и датчика на образце;

В – узел закрепления образца в испытательной установке

В главе 1 показаны перспективы использования экспериментально-расчетного подхода к созданию рецептур гетерогенных цементных материалов с улучшенными вибродинамическими показателями. Его преимущество обусловлено дополнением прямых экспериментальных данных, полученных на базе современных испытательных стендов, вычислительными и графическими возможностями численного моделирования.

Численное моделирование работы бетонного образца-балочки производилось в среде Solidworks Simulation по схеме, показанной на рисунке 33. В качестве граничных условий задавалось отсутствие перемещений в местах контактов зажимов и образца, а

крепление датчика и виброгенератора моделировалось в виде прикрепленной массы (m_2).

Пример, иллюстрирующий возможности экспериментально-расчетного подхода, показан на рисунке 37 и в таблице 17. Был реализован модальный анализ цифровой модели бетонного образца со следующими параметрами: $E=48$ ГПа; $\rho=2360$ кг/м³; $m_1=0,058$ кг; $l_1=220$ мм; $l_2=205$ мм; $h=19$ мм; $b=28$ мм.

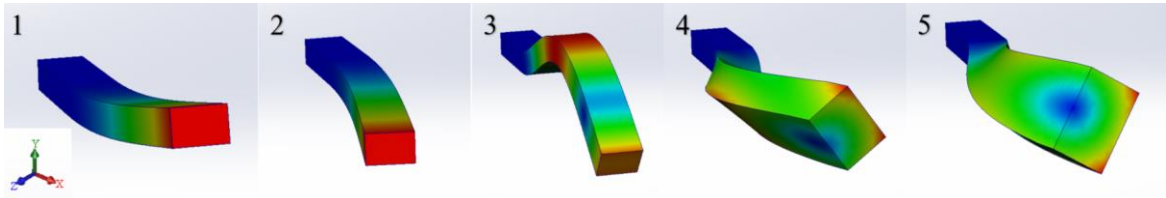


Рисунок 37 – Результаты модального анализа образца бетона

Таблица 17 – Результаты модального анализа образца бетона

№ режима	Частота, Гц	Действительный коэффициент массового участия/направление (ось)		
		X	Y	Z
1	229	1.96E-05	0.49937	1.54E-07
2	337	5.62E-09	1.05E-07	0.50537
3	1599	0.00034428	0.13485	6.63E-09
4	2237	1.73E-08	3.00E-08	0.090854
5	2348	1.97E-08	1.31E-07	0.047449
6	4358	0.36995	0.0192	1.13E-08
7	4530	0.2687	0.025761	4.43E-08
8	6117	4.52E-07	9.80E-09	0.045386
9	7503	8.75E-11	9.30E-08	5.62E-05
10	8284	0.00087733	0.022265	6.77E-08
11	11000	2.52E-07	6.79E-08	0.02143
12	12605	0.0055146	0.012507	1.71E-07
13	13290	3.91E-07	2.98E-09	8.50E-07
14	13869	0.070849	0.00094463	2.86E-07
15	16295	2.34E-07	2.91E-07	0.0073503
16	17297	1.08E-05	0.11993	1.97E-07
17	17458	0.00066325	0.019894	3.92E-08
18	17700	1.31E-08	8.26E-08	0.15527
19	19236	3.73E-08	1.65E-09	0.00010515

Согласно полученным результатам, максимальный коэффициент массового участия в вертикальном направлении соответствует режиму колебаний № 1, при этом резонансная частота расположена в выбранном ранее диапазоне.

Для создания колебаний использовался виброгенератор (рисунок 36, А, Б) мощностью 25 Вт с комплексным сопротивлением 4 Ом и собственной резонансной частотой $(60 \pm 1,2)$ Гц. Далее выполнялся гармонический анализ. В качестве эталона сравнения использован стальной образец с известными характеристиками ($E=210$ ГПа; $\rho=7850$ кг/м³). Модуль упругости определялся итерационным методом с помощью программных инструментов оптимизации до совпадения величины E фактической и определенной при моделировании резонансных частот. Для вычисления логарифмического декремента затухания данные виброускорения, поступающие с датчика, пересчитывались в значения виброперемещения по формуле (28).

Полученные результаты представлены на рисунке 38. Их анализ показал хорошую сходимость с теоретическими данными [54] и результатами других исследователей [53, 110]. С помощью эталонного образца устанавливалась взаимосвязь между коэффициентом усиления сигнала, передающегося на виброгенератор и значением эквивалентной силы вибровоздействия ($F_{\text{вibr}}$).

При резонансном методе вычисление логарифмического декремента затухания (δ) производилось по формуле:

$$\delta = \frac{\pi \cdot \frac{A \cdot f^2}{A_r \cdot f_r^2} - \frac{A}{A_r}}{\sqrt{\frac{A^2 \cdot f^2}{A_r^2 \cdot f_r^2} - 1}}, \quad (30)$$

где f – выбранная частота колебаний, Гц;

f_r – частота резонанса, Гц;

A – амплитуда колебаний при частоте f ;

A_r – амплитуда колебаний при резонансе.

Поскольку связь между логарифмическим декрементом затухания и коэффициентом затухания выражается формулой

$$\delta = \frac{2 \cdot \pi \cdot \zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \approx 2\pi\zeta, \quad (31)$$

то формула для вычисления коэффициента затухания имеет вид:

$$\zeta \approx \frac{\frac{A \cdot f^2}{A_r \cdot f_r^2} - \frac{A}{A_r}}{2 \cdot \sqrt{\frac{A^2 \cdot f^2}{A_r^2 \cdot f_r^2} - 1}}. \quad (32)$$

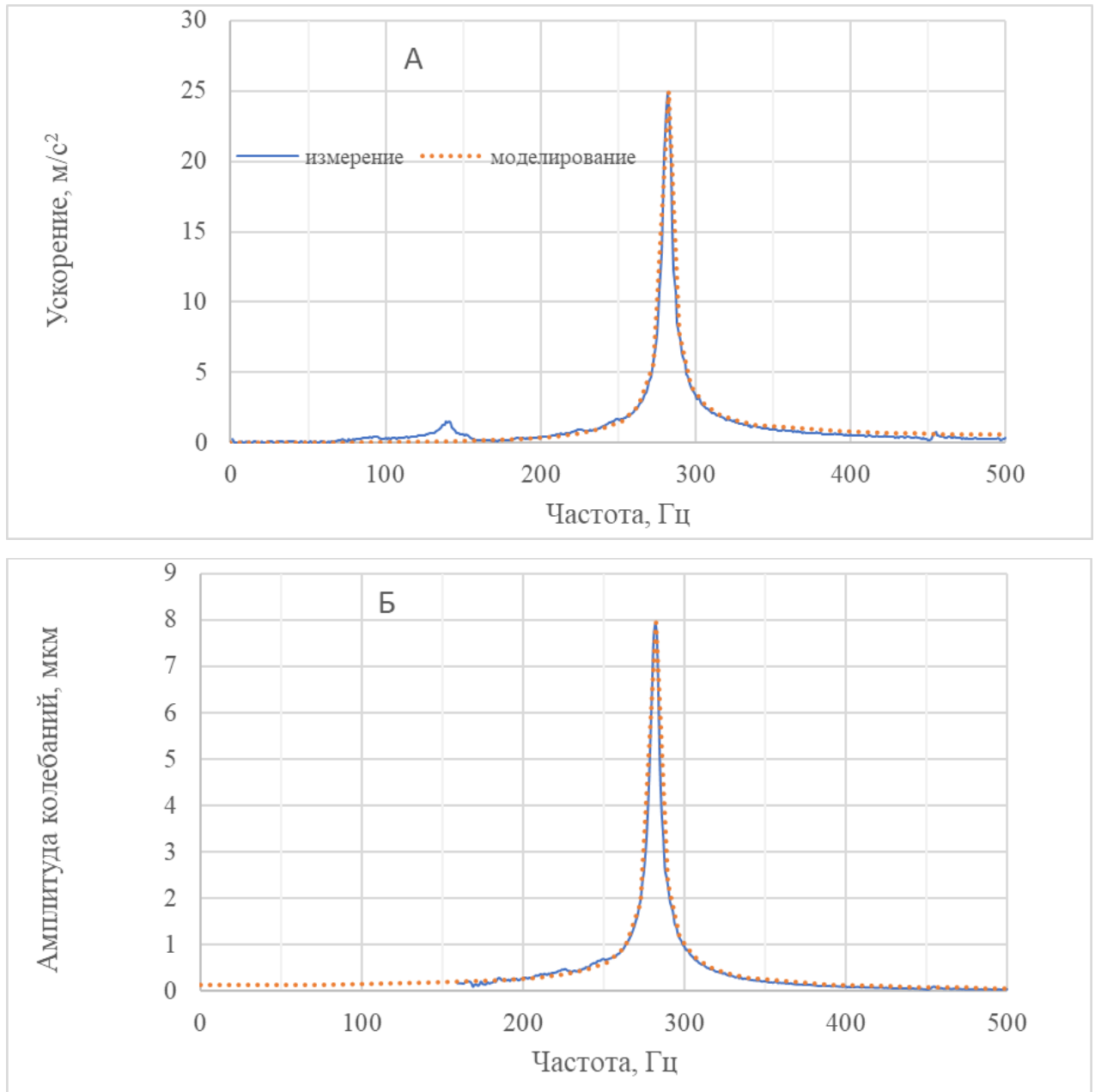


Рисунок 38 – Графики отклика стального образца при вибрационных испытаниях:

А – виброускорение; Б – амплитуда

Результаты испытаний образца бетона приведены на рисунке 39. Коэффициент затухания (ζ) определялся по формуле (32).

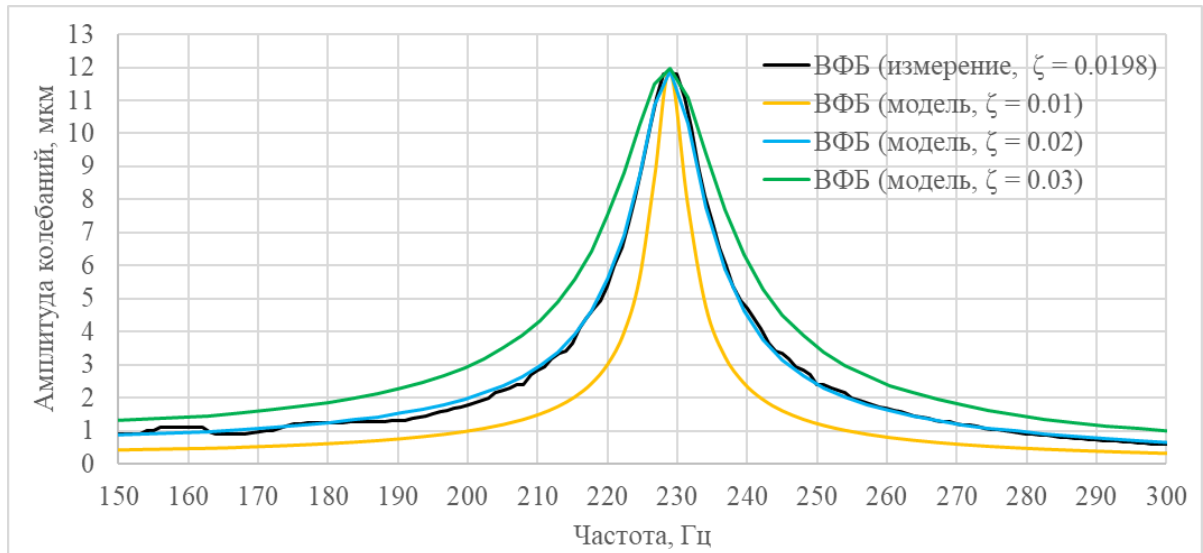


Рисунок 39 – Амплитудно-частотная характеристика образца бетона и моделей с заданными значениями ζ

Дополнительно на рисунке 39 представлены результаты численного моделирования. Их сравнение показывает, что формула (32) позволяет получить значение ζ , совпадающее с заданным в свойствах системы при моделировании вне зависимости от частоты f , выбранной при расчёте (рис 40, А).

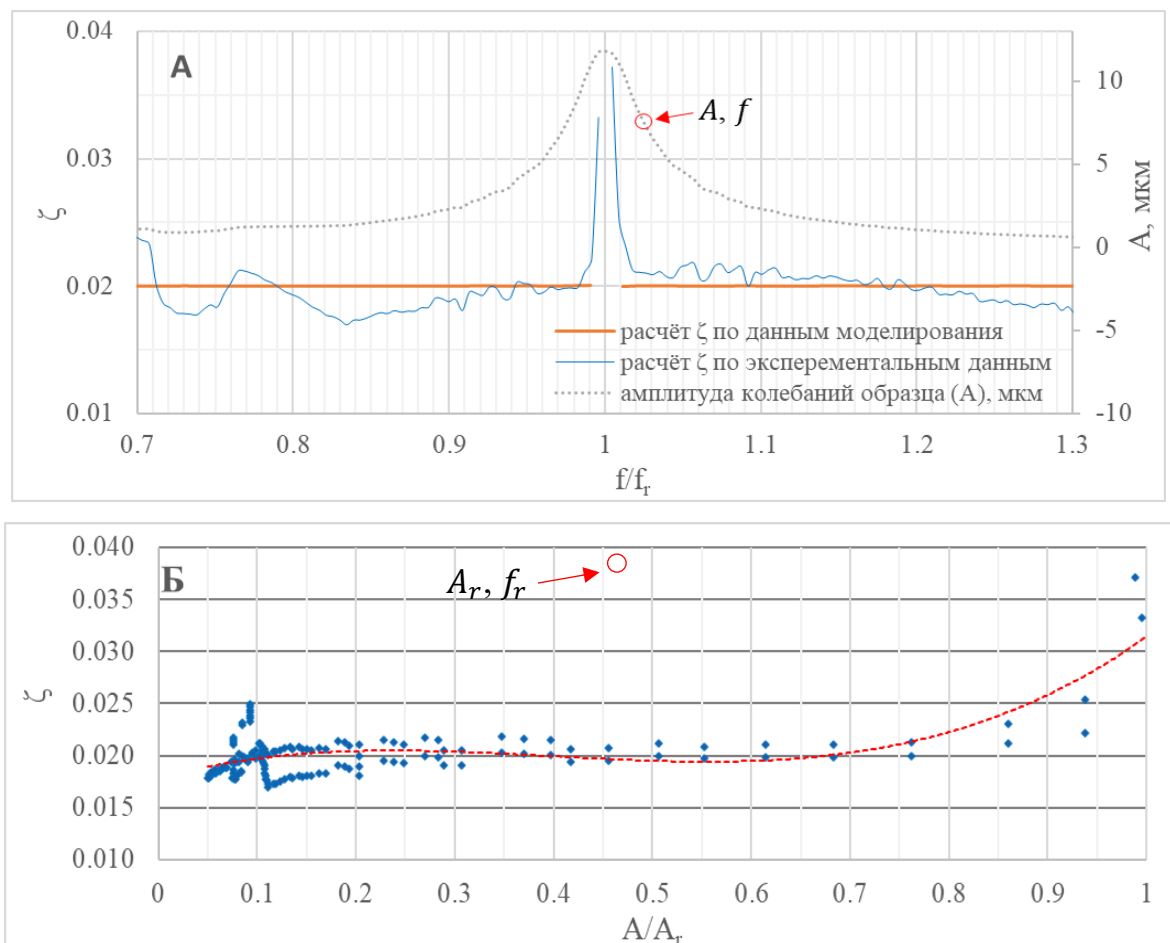


Рисунок 40 – Результаты определения относительного коэффициента затухания

Более детальные вибродинамические испытания образцов различных материалов (рисунок 40, Б) позволили установить, что расчёты с использованием экспериментальных данных корректнее производить в диапазоне частот, когда выполняется условие $\frac{A}{A_r} = 0,2 - 0,7$.

Результаты апробации установки позволили скорректировать программный код микроконтроллера, придав ему функции записи и анализа поступающих данных в автоматическом режиме. При этом изменены и добавлены следующие процедуры:

1) Генерация сигнала со ступенчато изменяющейся частотой в диапазоне 100–500 Гц (шаг 10 Гц, продолжительность 0,05 с). На каждой ступени по результатам опросов датчика вычисляется средний максимум ускорения по вертикальной оси. На этом этапе производится экспресс-сканирование всего диапазона частот для определения областей резонанса.

2) Генерация сигнала со ступенчато изменяющейся частотой в диапазоне ± 50 Гц от f_r с шагом 0,1 Гц и продолжительностью ступени 0,1 с. По результатам 10 итераций строится резонансный пик, определяется резонансная частота и вычисляется среднее значение ζ на основе частот, соответствующих диапазону $\frac{A}{A_r} = 0,2 - 0,7$. Для оценки результата определяется коэффициент вариации.

3) Определённые экспериментально величины (f_r , ζ) передаются в структурированном виде на компьютер и параллельно записываются на карту памяти.

В рамках усовершенствования экспериментальных методов определения вибродинамических показателей ВФСУБ оценивалась применимость метода свободных (затухающих) колебаний применительно к исследованию гетерогенных строительных материалов с жестко фиксированными структурными связями. Метод свободных колебаний позволяет производить оценку поперечных (изгибных) и продольных колебаний. В первом случае образец устанавливается на двух опорах (во втором – подвешивается на нитях), расположенных на расстоянии $0,224L$ от его торцов (рисунок 41). Возбуждение колебаний осуществляется модальным молотком, а в случае образцов малых размеров – стальным шариком на упругом стержне (ASTM E1876). Метод был производственно апробирован на предприятии станкостроительного профиля (Приложение А).

При измерении поперечных колебаний пьезоэлектрический датчик закрепляли на образце вблизи опоры для снижения искажений от его массы. Данные виброотклика

оцифровывались с частотой дискретизации 192 кГц и передавались на компьютер для последующей обработки. Общий вид испытательной установки и экспериментальных образцов представлен на рисунке 42.

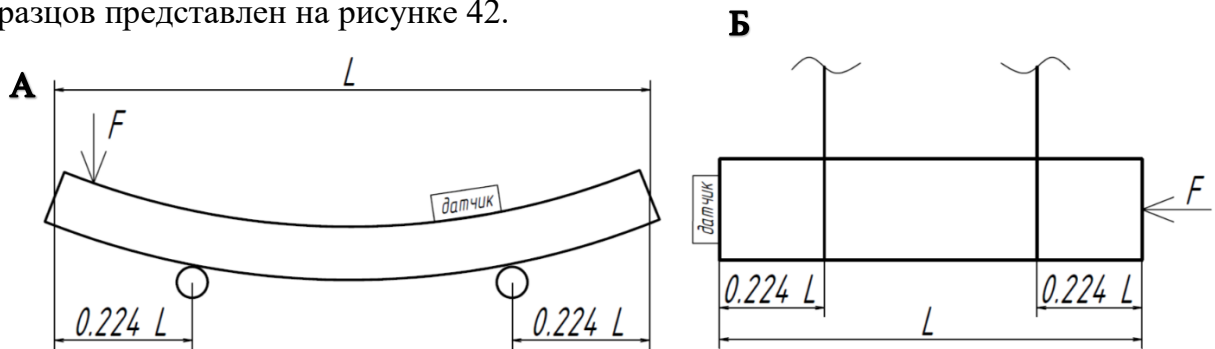


Рисунок 41 – Схемы испытаний: А – метод изгибных колебаний; Б – метод продольных колебаний

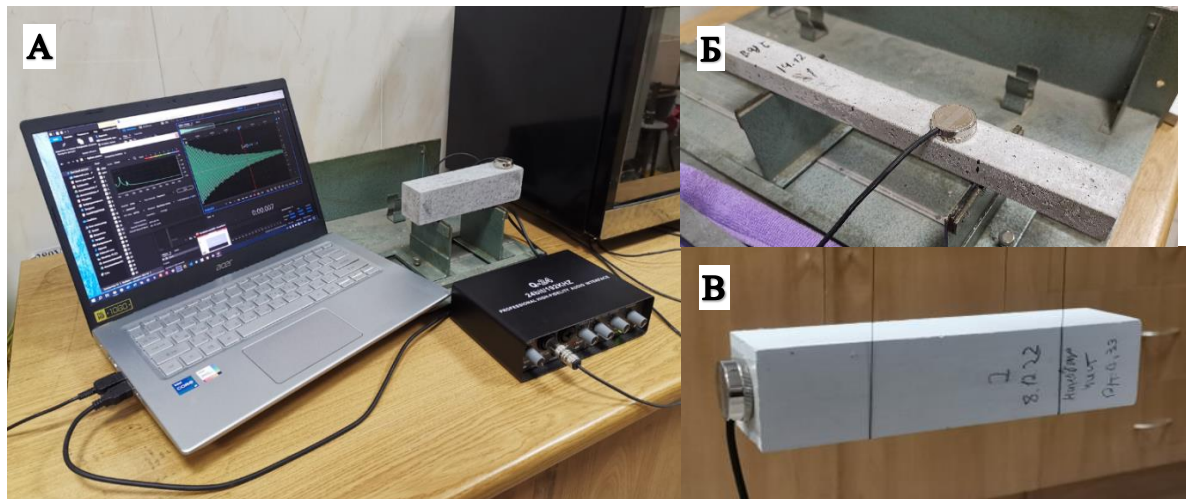


Рисунок 42 – Лабораторный комплекс исследования вибродинамических характеристик строительных материалов методом свободных колебаний: а – общий вид (метод изгибных колебаний); б – образец с датчиком; в – образец, подвешенный на нитях (метод продольных колебаний)

При схеме испытаний А (рисунок 42) расчетная зависимость величины E_d имеет вид [111]:

$$E_d = \frac{xTf^2L^3m}{bh^3}, \quad (33)$$

где x – коэффициент формы колебаний ($x=0,946-0,965$);

T – коэффициент, учитывающий отношения высоты сечения к длине образца и влияние коэффициента Пуассона ($T=1,02-1,20$);

f – частота первой изгибной моды, Гц;

L – длина образца, м;

m – масса образца, кг;

b – ширина сечения образца, м;

h – высота сечения образца, м.

При условии $l/h \geq 20$, значение T вычисляется по формуле [111]:

$$T \approx 1 + 6.585 \left(\frac{h}{l} \right)^2. \quad (34)$$

При схеме продольных колебаний определение E_d основано на вычислении скорости (V) распространения волны напряжений в призматическом образце. При условии $d(b) \ll l$, (32) где $d(b)$ – размеры поперечного сечения образца скорость звука (м/с) в образце определяется известным соотношением

$$V = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}}. \quad (35)$$

Следовательно

$$E_d = V^2 \rho, \quad (36)$$

При несоблюдении соотношения (32) возникает необходимость учета влияния коэффициента Пуассона [111].

Параметр V и первая собственная частота продольных колебаний связаны зависимостью

$$V = 2lf, \quad (37)$$

где f – первая собственная частота продольных колебаний, Гц.

После подстановки уравнение для расчета динамического модуля упругости при продольных колебаниях примет вид

$$E_d = 4l^2 f^2 \rho. \quad (38)$$

Как было сказано ранее, демпфирование при колебательных процессах описывается с помощью различных взаимосвязанных характеристик [54]. Для случая свободных колебаний рационально определять логарифмический декремент затухания:

$$\delta = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}}, \quad (39)$$

где A_i и A_{i+1} – амплитуды двух последовательных колебаний.

Анализ экспериментальных данных показал, что прямая итеративная подстановка величин соседних амплитуд с вычислением среднего δ не обеспечивает необходимую

повторяемость результатов. Усовершенствованный алгоритм, предполагает построение вспомогательной экспоненциальной модели сигнала затухающих колебаний и оценку ее сходимости по коэффициенту детерминации (R^2). На рисунке 43 приведена схема разработанного алгоритма проведения испытаний.

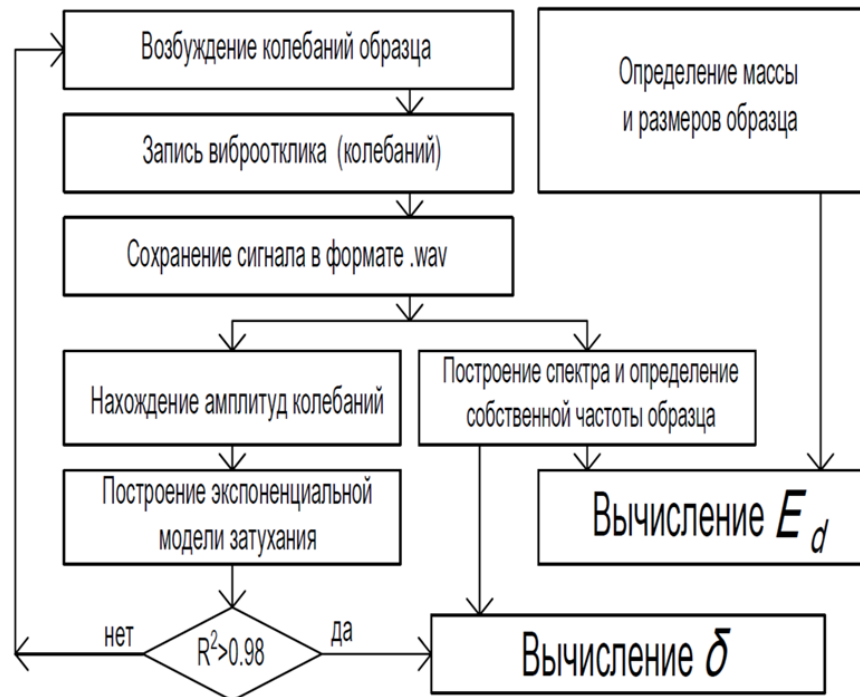


Рисунок 43 – Алгоритм определения величины δ методом свободных колебаний

Автоматизация процессов обработки сигнала и вычисления показателей реализована посредством составления программного кода, включающего следующие процедуры: нахождение амплитудных пиков сигнала, построение экспоненциальной модели затухания, определение собственной частоты колебаний образца, вычисление величин E_d и δ . Примеры реализации данного подхода для ряда строительных материалов, применяемых в промышленных конструкциях, показаны на графиках (рисунок 44). Исследованы образцы углеродистой стали, алюминиевого сплава и мелкозернистого ВФБ, разработанного на этапе практического внедрения результатов диссертационной работы по запросу инновационного машиностроительного предприятия (альтернатива Nanodur (Dyckerhoff) от BASF Construction Additives, GCP Applied Technologies Inc).

Коэффициент затухания определен путем аппроксимации процесса затухания следующей экспоненциальной функцией:

$$V(t) = a \cdot e^{-\zeta \omega t}, \quad (40)$$

где a – начальная амплитуда,

ζ – безразмерный коэффициент затухания,

ω – круговая собственная частота образца,

t – время.

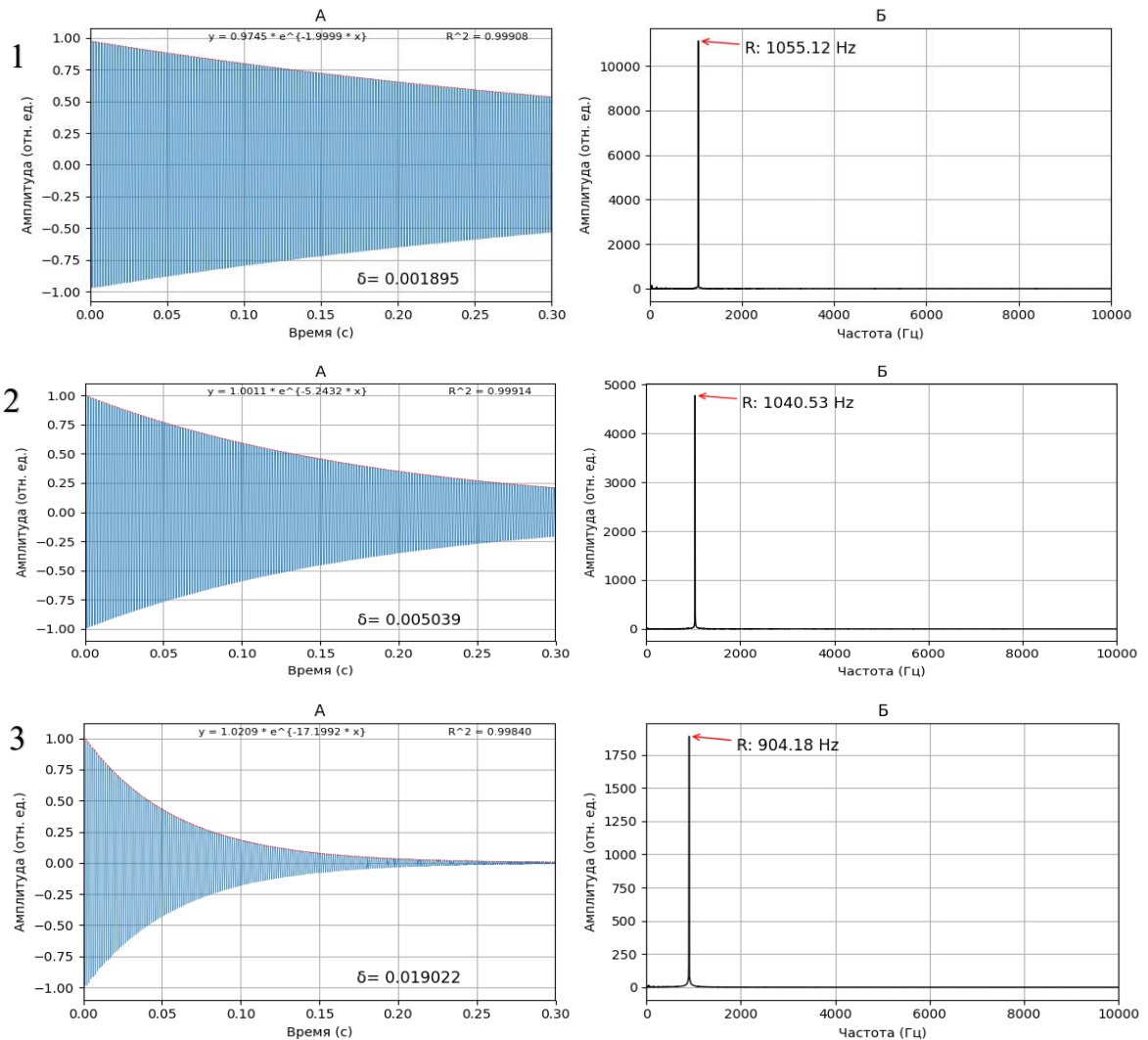


Рисунок 44 – Графики затухания (а) и частотные спектры (б) изгибных колебаний первой моды образцов конструкционных строительных материалов:

1 – сталь; 2 – алюминиевый сплав; 3 – разработанный ВФБ

Коэффициент затухания в уравнении (40) – безразмерная величина в пределах от 0 до 1. В зарубежных нормах гражданского строительства и проектирования конструкций принято выражать коэффициент затухания в %, что представляется более наглядным.

Результаты экспериментов по определению динамического модуля упругости и логарифмического декремента затухания для рассматриваемой группы конструкционных материалов приведены в таблице 18.

Повышенные значения декремента затухания свидетельствуют, что наблюдаемое занижение величины модуля упругости при использовании резонансного метода связано с рассеиванием части ударной нагрузки в зоне фиксации консольно-закреплённого об-

разца. В случае образцов малого размера неэффективность применения резонансного метода, предусматривающего схему свободного размещения балочек на опорах, обусловлена нестабильностью мест контактов при испытаниях.

Таблица 18 – Сравнительная оценка экспериментальных и справочных данных

Материал	Динамический модуль упругости, ГПа			Логарифмический декремент		
	справочные	экспериментальные /метод		справочные	экспериментальные /метод	
	по [9, 67]	свободных колебаний	резонансный	по [5, 9]	свободных колебаний	резонансный
Сталь 20	212	210,6	206,5	0,0018	0,00189	0,0024
Д16т	72	71,0	69,8	0,0049	0,00504	0,0061
ВФБ	-	45,3	43,9	0,01– 0,03	0,01902	0,0201

Из полученных данных видно, что в сравнении с вынужденными колебаниями исследование свободных перемещений обеспечивает улучшение повторяемости результатов и их сходимости со справочными значениями динамических характеристик.

Таким образом, показана техническая возможность создания лабораторного комплекса для исследования вибродинамических показателей бетонов, отвечающего современным требованиям, из доступных электронных и электромеханических компонентов.

Определение динамического модуля упругости и демпфирующих характеристик бетонов целесообразно проводить по более информативному методу вынужденных колебаний, обеспечивающему получение дополнительных данных по оценке степени изменения свойств материала после продолжительного динамического воздействия.

Для резонансного метода оптимальной является консольная схема закрепления образцов, обеспечивающая эффективную оценку отклика работы материала при генерации поперечных колебаний в широком частотном диапазоне (0–1000 Гц). Корректные экспериментальные данные обеспечиваются в случае, если параметры программного кода микроконтроллера предусматривают генерацию вибрационного воздействия со ступенчато изменяющейся частотой в диапазоне ± 50 Гц от резонансной частоты с шагом 0,1 Гц и продолжительностью ступени 0,1 с.

Сравнение величин относительного коэффициента затухания образцов бетона, полученных по результатам реального эксперимента, показало хорошую сходимость с данными численного моделирования в среде Solidworks Simulation.

Преимущество метода свободных колебаний – возможность прямого определения логарифмического декремента затухания. При этом продолжительность испытаний сокращается до двух-трех минут, а отсутствие значительных нагрузок на образец во время испытаний, позволяет испытывать бетон на ранних сроках твердения. Недостаток заключается в отсутствии возможности определения вибростойкости и усталостной прочности – показателей, характеризующих длительную работоспособность бетона.

Таким образом, для всестороннего изучения поведения бетонов, включая ВФСУБ, при вибродинамическом нагружении оптимальным представляется подход, основанный на рациональном сочетании двух методов.

Анализ частотных кривых отклика бетонных образцов-балочек базового состава показал наличие одного интенсивного пика, соответствующего первой колебательной моде. В случае балок с включениями-демпферами первоначальный пик микшируется с закономерным уменьшением величины максимальной амплитуды. Появляются дополнительные пики, расположенные до и после первой моды. Это доказывает факт, что частицы заполнителя с силиконовым покрытием способны эффективно абсорбировать энергию отклика первой моды, функционируя как несколько включений-демпферов. Относительно узкий диапазон частот их собственных колебаний приводит к формированию эффекта мультиплицирования, в результате которого совокупность частиц заполнителя работает как единый демпфер.

3.2 Разработка составов и исследование свойств высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов

Анализ опубликованных работ [3, 9, 10], проведенный в первой главе, позволил выделить основные критерии оптимизации составов и требования к бетонам для вибронагруженных промышленных конструкций. Составленный перечень требований к ВФСУБ включает следующие показатели:

- 1) высокая ранняя ($R_{сж(3сут)} > 70$ МПа, $R_{изг(3сут)} > 10$ МПа) и конечная прочность ($R_{сж(28сут)} > 100$ МПа, $R_{изг(28сут)} > 15$ МПа);
- 2) повышенный статический ($E > 40$ ГПа) и динамический модули упругости ($E_d > 40$ ГПа);

3) малые деформации общей усадки ($\varepsilon < 0,2\text{--}0,35$ мм/м) и сокращение сроков достижения ее предела (до 28 сут);

4) высокое сопротивление истиранию (не более $0,4$ г/см²);

5) низкая проницаемость по отношению к воде и эмульсиям СОЖ.

Для получения бездефектных деталей с высоким качеством поверхности методом литья установлены следующие требования к бетонной смеси:

- высокая растекаемость (диаметр расплыва по конусу Хагерманна более 270–300 мм);

- однородность структуры, связность, нерасслаиваемость;

- сохраняемость свойств с течением времени (30–45 мин).

При разработке базовых составов руководствовались требованиями и рекомендациями [4, 6, 9, 13, 14], а также собственными данными, полученными при исследовании эталонного состава, взятого для реперной оценки пригодности вариантов рецептурно-технологических решений. В качестве эталона принят известный состав ВФБ (УНРС), широко применяемый за рубежом для изготовления базовых деталей промышленного оборудования [47]. Компонентный состав образцов, использованных в исследованиях, включал: цементное вяжущее вещество Nanodur 5941 (Dyckerhoff GmbH, Германия) с расходом 1000 кг/м³ [48], заполнители на основе кварцевого песка фракций 0–2 мм и 2–5 мм, пластификатор – Melflux 5581F (рекомендация производителя Nanodur). Расход воды в эталонных составах составлял $165\text{--}175$ кг/м³ при среднем диаметре расплыва бетонной смеси 260 мм.

Активная часть разрабатываемых составов включала отечественные компоненты – портландцемент ЦЕМ 0 52,5Н (ПЦ=720–740 кг/м³) и ГП Sika Visco Crete 226-P (1 % ПЦ). При выборе гиперпластификатора руководствовались результатами определения величин пластифицирующего и водоредуцирующего эффекта, а также совместимостью ГП с вяжущим веществом, которую оценивали методом полуадиабатической калориметрии на установке усовершенствованной конструкции (см. главу 2). В качестве минеральной добавки использовался микрокремнезём МК-85 (10–12 % от массы ПЦ), а в качестве наполнителя – тонкомолотый песок Сурского месторождения ($S_{уд}=450\text{--}550$ м²/кг). Более крупные фракции представлены фракционированным кварцевым песком Сурского месторождения (0,16–0,315 и 0,315–0,63 мм) и отсевом дробления гранитного щебня (0,63–2,5 и 2,5–5 мм). Водоцементное и водотвёрдое отношения в базовых

составах равны 0,25 и 0,08 соответственно, при этом диаметр расплыва достигал 310–320 мм. Результаты определения прочности при изгибе и при сжатии образцов показаны на рисунке 45.

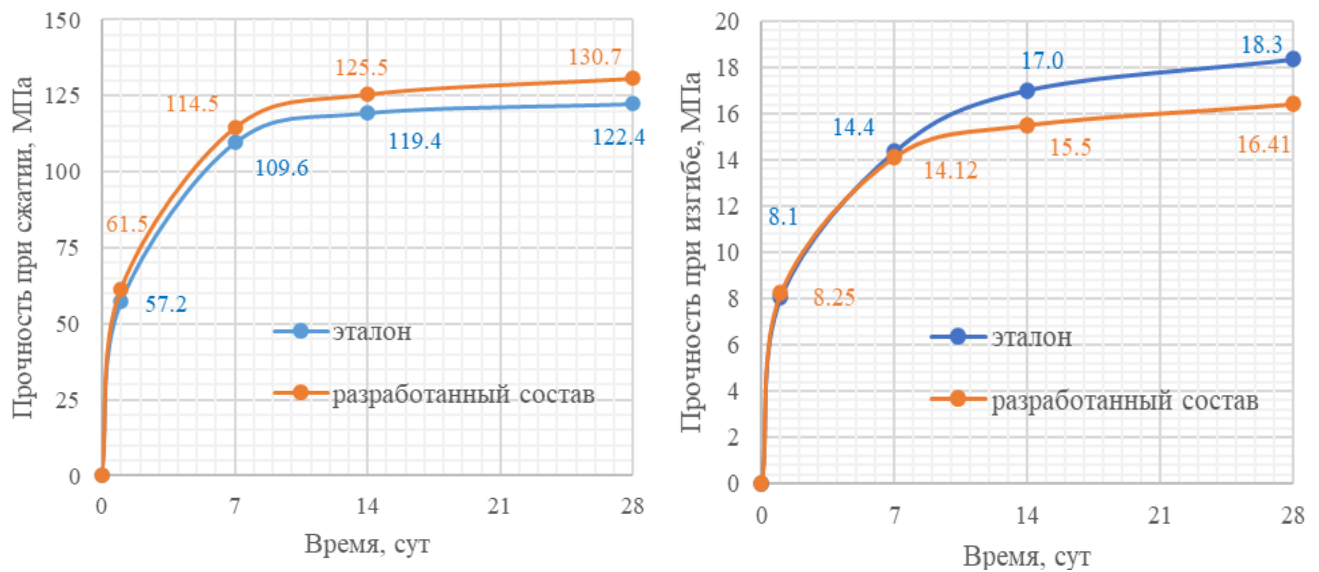


Рисунок 45 – Кинетика набора прочности бетонных образцов

Из графиков видно, что на всех этапах твердения прочностные показатели разработанного базового состава близки к эталонному. Кубиковая прочность при сжатии образцов базового состава в возрасте 28 суток составляет 130 МПа, превышая эталонный на ~6 %, при этом изгибная прочность ниже на 10 %. Можно отметить высокую суточную прочность базового состава ($R_{сж}=61,5$ МПа, $R_{изг}=8,3$ МПа).

Статический модуль упругости базовых составов определяли в возрасте 1, 7, 14 и 28 суток на образцах-балочках при четырёхточечном изгибе в соответствии с рекомендациями ГОСТ 24544-2020 на установке, описание конструкции которой приведено во второй главе [67]. Было реализовано постепенное нагружение образца до нагрузки 0,3 от разрушающей при которой и вычислялся статический модуль упругости.

Результаты экспериментов приведены на рисунке 46.

Наблюдается наиболее интенсивный прирост данного показателя в первые 7 суток твердения, после чего скорость увеличения модуля упругости заметно снижается. Значение модуля упругости базового состава в возрасте 28 суток составляет 40,9 ГПа, что соответствует практическим рекомендациям [9] и находится на уровне 85 % показателя эталона. Полученные значения хорошо коррелируют с данными по прочности при сжатии, что указывает на формирование плотной и жесткой цементной матрицы.

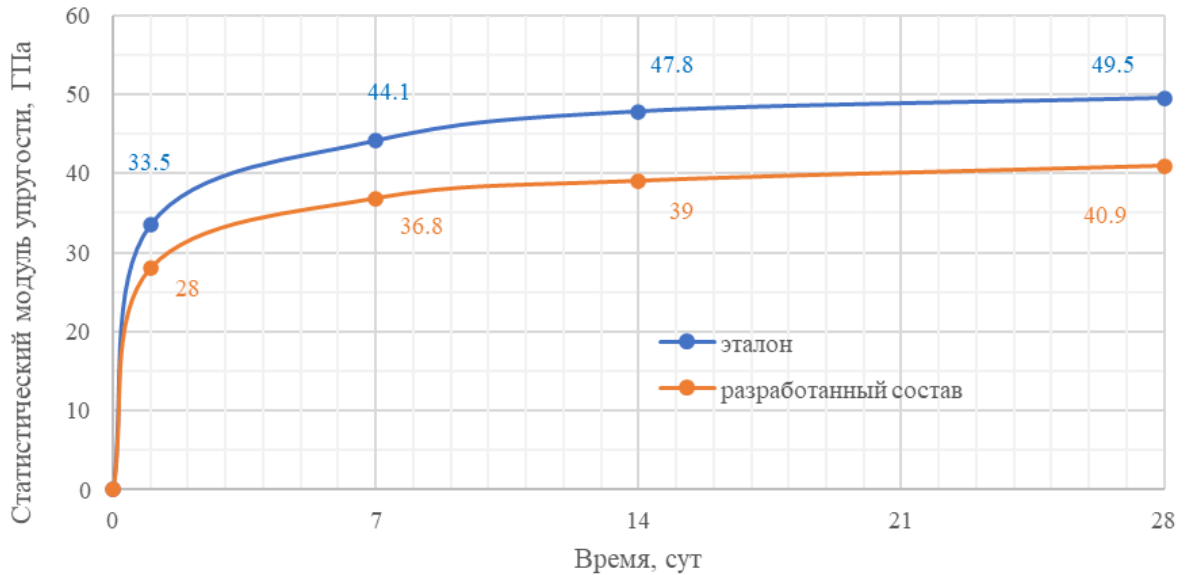


Рисунок 46 – Кинетика изменения модуля упругости бетонных образцов

Усадочные деформации определяли на образцах-призмах $160 \times 40 \times 40$ мм, снабженных закладными деталями-реперами (ГОСТ 24544-2020). Образцы распалубливали на следующие сутки после формования и помещали в камеру с нормальными условиями твердения на семь суток. При распалубке производилась калибровка и измерение первоначального размера образцов. Для исследования влияния времени выдержки образцы базового состава группировали на две серии, которые выдерживали 7 и 28 суток при нормальных условиях перед извлечением на воздух. Экспериментальные данные усадки образцов представлены на рисунке 47.

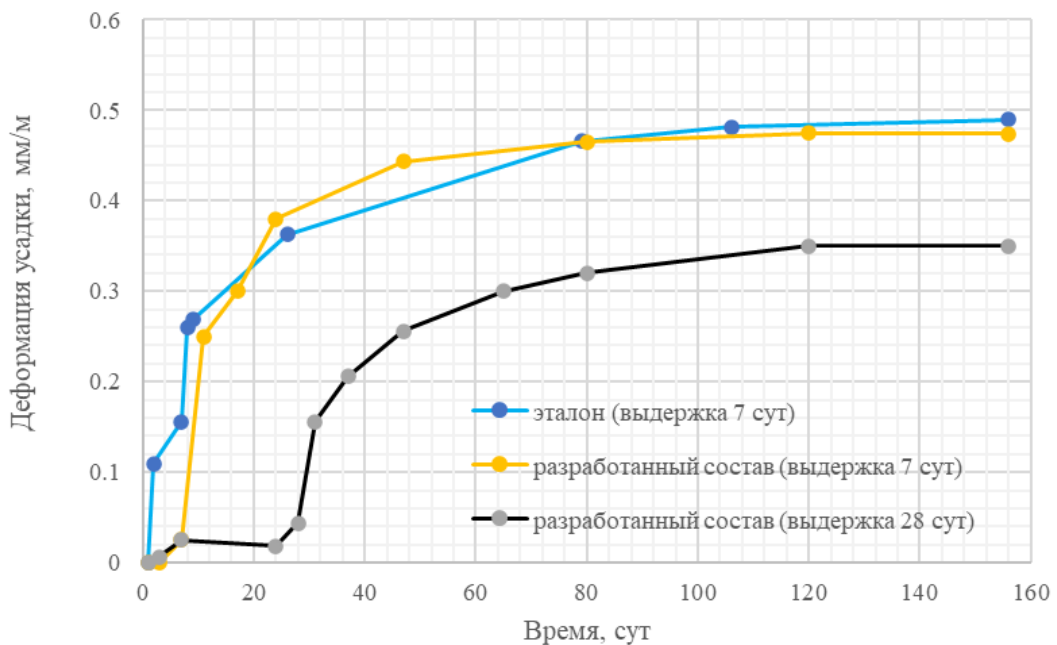


Рисунок 47 – Кинетика деформации усадки бетонных образцов

Результаты, приведенные на рисунке 47, показывают, что общая деформация усадки базового состава при выдержке в камере нормального твердения в течение семи суток составляет 0,474 мм/м и находится на уровне значения эталонного состава. Дополнительно исследовалась усадка образцов выдерживаемых при н.у. в течение 28 суток. Полученные данные свидетельствуют, что увеличение продолжительности выдержки способствует снижению общей деформации усадки образцов разработанного состава до 0,32–0,35 мм/м. Наблюдаемый феномен показывает эффективность применения технологических факторов, связанных с моделированием оптимальных условий и режимов твердения в целях снижения собственных деформаций ВФСУБ.

Выход на плато графиков общей деформации усадки наблюдается в возрасте 120–160 суток, что благоприятствует применению ВФСУБ в различных промышленных конструкциях, включая станкостроение и технологическое оборудование [1, 44].

Проведенные исследования показали техническую возможность получения ВФСУБ на отечественных компонентах, которые при правильном подборе рецептур, обеспечивают достижение уровня показателей основных технических свойств сравнимого с лучшими зарубежными аналогами. Актуальные задачи, требующие своего решения в рамках разработки управляющих химико-технологических факторов, связаны со снижением общей усадки до 0,2 мм/м при ограничении сроков ее достижения 28 сутками.

Следующий этап включал оптимизацию рецептуры базового состава путем поиска наиболее эффективной пластифицирующей добавки. С этой целью сначала исследовалась совместимость таких добавок с портландцементом (ЦЕМ 0 52,5Н) по показателям растекаемости цементного теста (реологическая матрица 1-го уровня) и прочности к заданному сроку твердения.

Образцы формовали, исходя из требования достижения показателя растекаемости (расплыв из конуса Хагерманна >270 мм), при этом усредненная величина В/Ц составила 0,212. Пластификатор вводился с полным объемом воды затворения. Наблюдаемый максимум растекаемости при принятом порядке введения компонентов наступал через 3–6 минут после затворения. В этой связи растекаемость определяли через 6–7 минут после перемешивания сухих компонентов с водным раствором пластификатора. Эталоном, по которому производилось сравнение показателей реологических свойств на данном этапе

разработки составов, оставалась система Nanodur 5941 + 1% Melflux5581f при В/Т 0,16 ($D_{распл}=315$ мм). Результаты опытов приведены на рисунках 48 и 49.

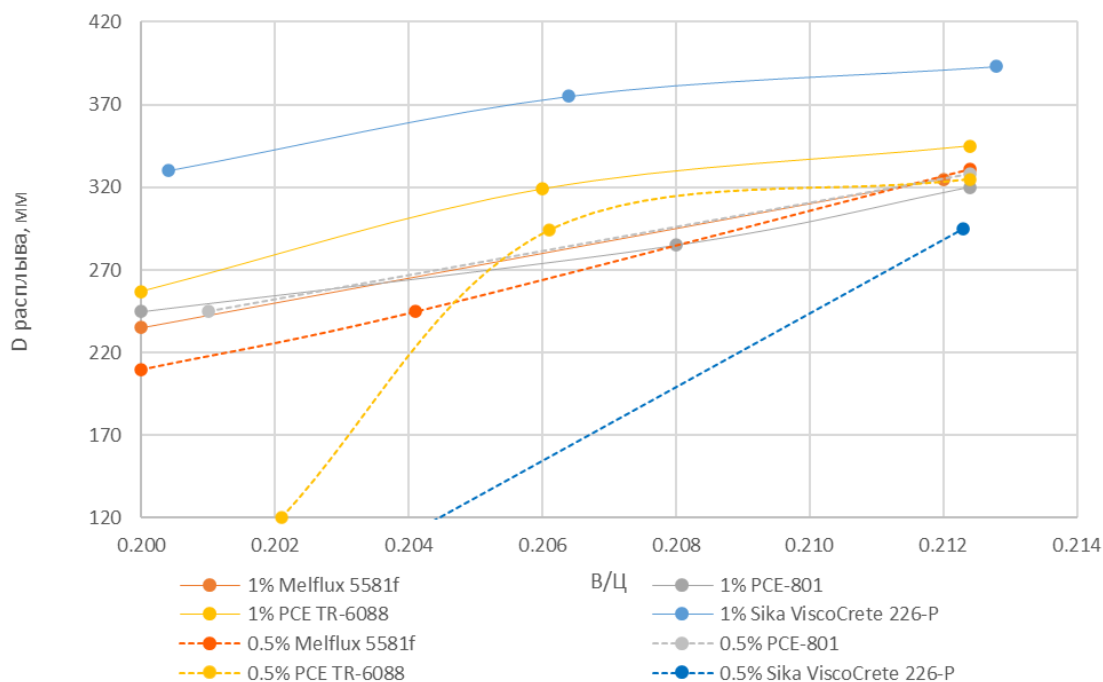


Рисунок 48 – Влияние В/Ц отношения, количества и вида ГП на распыл цементного теста

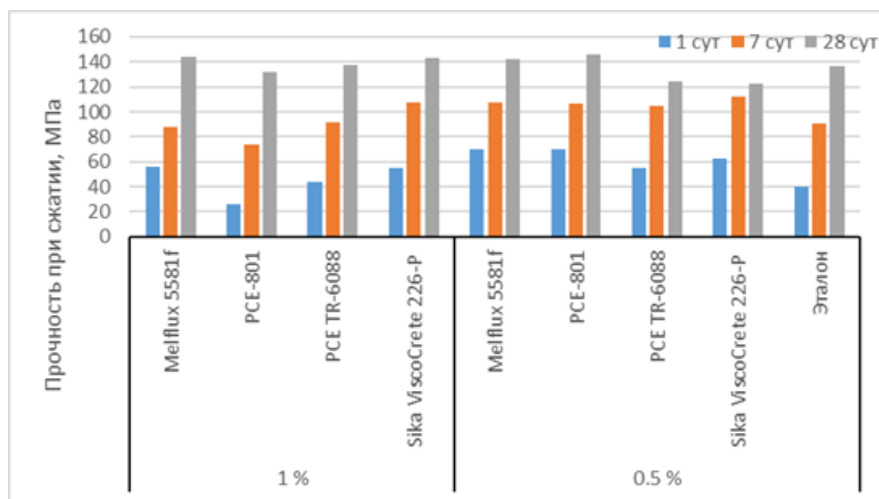


Рисунок 49 – Влияние количества и вида ГП на кинетику нарастания прочности цементного камня ($В/Ц=0,212$)

Данные, приведенные на графиках, показывают, что максимальный пластифицирующий эффект в диапазонах истинных водоцементных отношений, характерных для высокопрочных составов ВФБ ($0,2 \leq В/Ц \leq 0,213$), показывает добавка Sika ViscoCrete 226-P при ее введении в количестве 1 % от массы цемента. При дозировке 0,5 % наилучшие показатели растекаемости получены с ГП PCE-801. На диаграммах нарастания прочно-

сти (рисунок 49) присутствует горизонтальный участок, указывающий на замедляющий эффект добавки PCE-801 при ее дозировке 1 %.

Результаты экспериментов позволили установить оптимальные дозировки ГП: 0,8 – 1% – Melflux 5581f, PCE TR-6088, Sika ViscoCrete 226-P; 0,4–0,6% – PCE-801.

Активные минеральные добавки относятся к группе обязательных сырьевых компонентов, входящих в состав всех высокофункциональных цементных бетонов. На предварительном этапе ранжирование пригодности минеральных добавок проводили по величине их пуццолановой активности, которая, проявляется в способности химически связывать портландит с эффектом увеличения прочности микроструктуры цементного камня [79].

В соответствии с классификацией по генезису исследуемые минеральные добавки включали следующие группы:

- целевые продукты – микрокремнезём; высокоактивный метакраин; кварцевая мука (маршалит);
- измельченные природного происхождения – песок Сурского месторождения, опока Пензенского месторождения, диатомит Инзенского месторождения, трепел Инзенского месторождения, отсев дробления гранита;
- молотые техногенного происхождения – бой оконного стекла; отход производства газосиликата. Удельная поверхность молотых природных компонентов и техногенных отходов составляла 250–300 м²/кг.

Определение величины коэффициента пуццолановой активности проводили по экспресс-методу, изложенному в [69]. На рисунке 50 приведены результаты опытов по оценке коэффициента пуццолановой активности проб материалов (K_p).

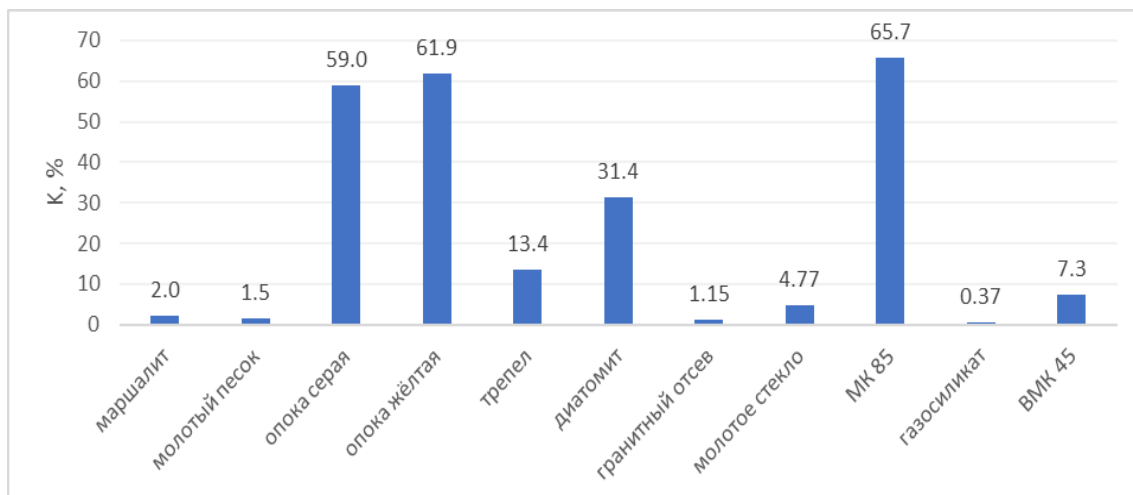


Рисунок 50 – Результаты определения пуццолановой активности минеральных добавок

Согласно полученным данным по величине K минеральные добавки группируются следующим образом: первая группа ($K \rightarrow \max$) включает микрокремнезём и опоку, вторая группа – диатомит и трепел; третья группа – все остальные компоненты, включая метакраолин. Для ВМК-45 активность, определенная в ходе эксперимента, не является релевантной, т.к. его отличает иной механизм проявления пуццолановой реакции.

Исследовались возможности повышения активности минеральных добавок природного происхождения. Установленный выше факт наличия у отдельных природных компонентов активности, близкой по величине к общепризнанному целевому продукту МК-85, стало основанием для постановки дополнительного эксперимента.

Известно, что широко применяемым способом повышения активности минеральных добавок является их термическая активация [16]. Для исследования влияния температуры нагрева на изменение пуццолановых свойств добавок принято два режима термической обработки: ТО-1 – нагрев в течение 20 минут до $t=620\text{ }^{\circ}\text{C}$, изотермическая выдержка в течение 30 минут и медленное остывание в течение двух часов вместе с печью; ТО-2 – 20 минутный нагрев до $t=620\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 минутная изотермическая выдержка и резкое охлаждение в воздушной среде со скоростью $50\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Результаты проведенных экспериментов представлены на рисунке 51.

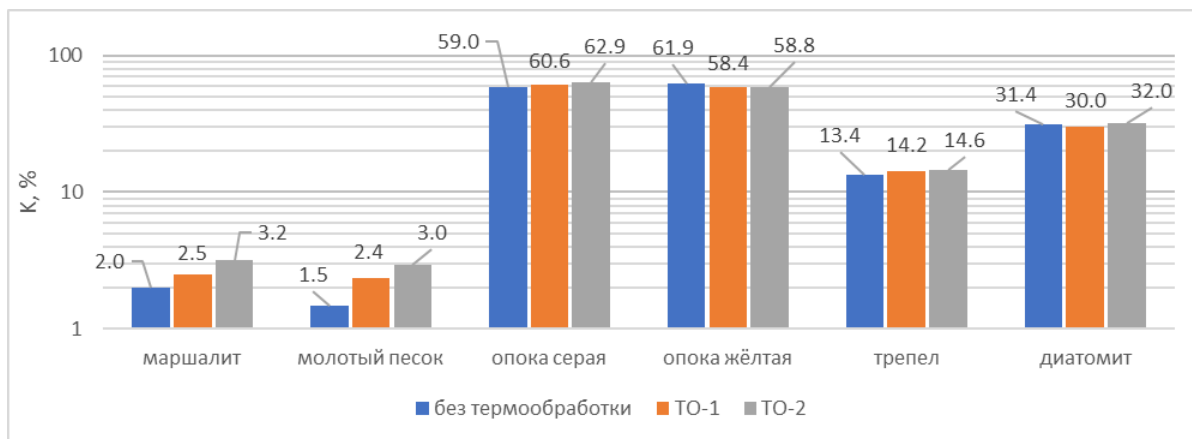


Рисунок 51 – Влияние термической обработки на изменение коэффициента пуццолановой активности

Анализ данных позволил установить следующее. Максимальный эффект термообработки проявляется на кварцевом песке, состоящем из кристаллического кварца, что связано с развитием дефектов микроструктуры в результате термических напряжений (фазовый $\alpha \rightarrow \beta$ переход при $573\text{ }^{\circ}\text{C}$). При этом резкое охлаждение проб под воздействием воздушного потока (режим ТО-2) ожидаемо повышает величину достигаемого эффекта.

Тем не менее, активность термоактивированных кварцсодержащих добавок остается недостаточной для проявления ими практически значимых пуццолановых свойств. Породы, образованные аморфным кремнезёмом, не проявляют значительного роста пуццолановой активности после термообработки. Таким образом, для проведения дальнейших исследований были отобраны микрокремнезём и метакеолин.

Выбор минеральных добавок продолжили исследованием влияния их вида на реологические и прочностные свойства цементных матриц 2-го уровня. Для этогоготавливали модельные (цементно-водно-порошковые) матрицы, содержащие цемент, пластификаторы (в установленных ранее оптимальных дозировках) и активные минеральные добавки в количестве 15 % от ПЦ. Водотвердое отношение корректировалось до обеспечения расплава мини-цилиндра 70–80 мм (соответствует 270–300 мм по конусу Хагерманна). Значения В/Т для составов с требуемой растекаемостью представлены на рисунке (52, А). На рисунке (52, Б) приводятся диаграммы нарастания прочности на сжатие.

Из результатов диаграмм видно, что в сравнении с метакеолитом составы на основе микрокремнезёма характеризуются значительно меньшей водопотребностью. Наилучшие показатели водоредуцирования получены на добавке Sika 226-р, что благоприятно отражается на конечной прочности образцов материала. Кроме этого, можно отметить высокую суточную прочность образцов с PCE-801 и Melflux 5581f.

С учетом полученных результатов дальнейшие исследования целесообразно проводить, отталкиваясь от показателей составов, содержащих в качестве пластификатора ГП Sika 226-р, а в качестве активного минерального компонента – микрокремнезём МК-85.

Оптимальная степень замещения цемента микрокремнезёмом также определялась на составах матриц 2-го уровня. Известно, что оптимальную дозировку микрокремнезёма назначают по показателям его дисперсности и активности [15, 68]. Так, дозировка низкокачественного микрокремнезёма достигает 15–20 % цемента, в то время как аналогичный показатель ультрадисперсного микрокремнезёма с высокой пуццолановой активностью колеблется в пределах 1–5 %.

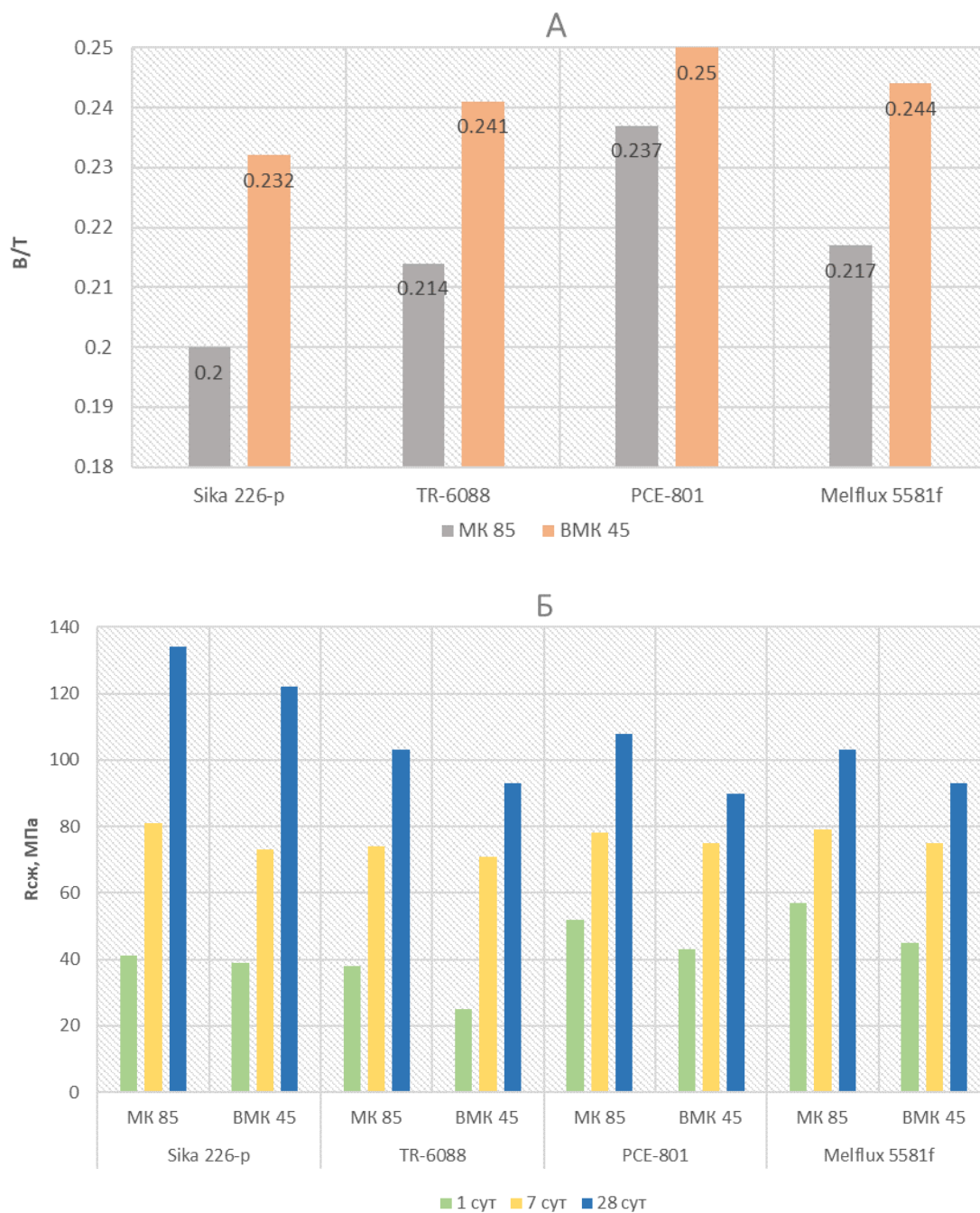


Рисунок 52 – Влияния вида минеральных добавок на свойства цементных матриц 2-го уровня: А – значение водотвердого отношения смесей равной растекаемости с различными ГП; Б – прочность на сжатие

Были приготовлены составы, содержащие портландцемент, ГП Sika 226-p (1 % от ПЦ) и микрокремнезём в дозировке 0, 10 и 15 % от ПЦ. Результаты экспериментов приведены на рисунке 53.

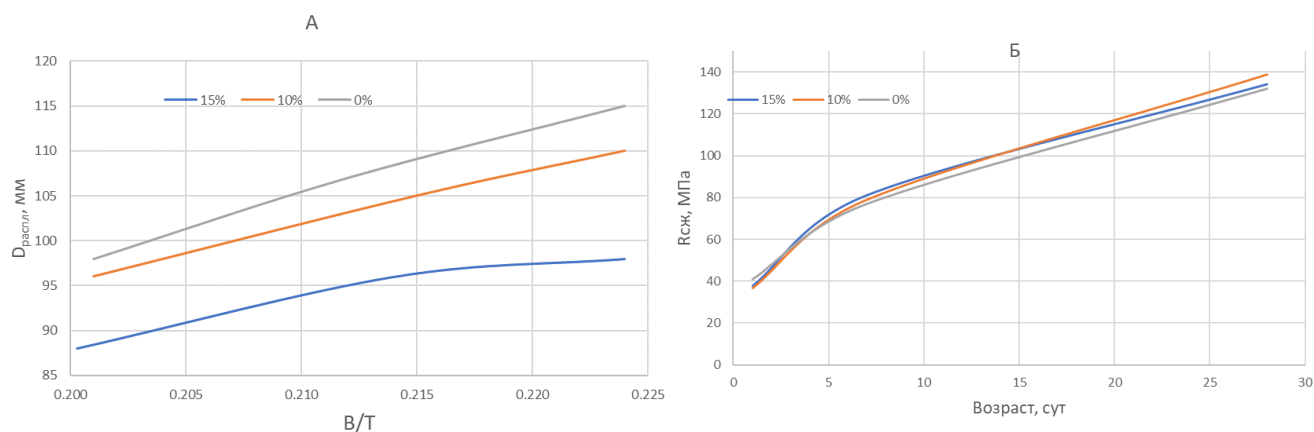


Рисунок 53 – Влияние добавки МК-85 на свойства цементных матриц 2-го уровня:

А – реологические; Б – прочностные ($V/T=0,225$)

Из приведенных данных видно, что оптимальное содержание микрокремнезема не превышает 10 %. Увеличение содержания МК-85 до 15 % ведёт к снижению растекаемости суспензии, при отсутствии прироста прочности. Исходя из полученных данных и результатов определения пуццолановой активности, в качестве оптимальной была принята дозировка МК-85 в количестве 8–10 % от массы цемента. В таблице 19 приведены экспериментальные составы бетона.

Таблица 19 – Экспериментальные составы бетона

Состав	Эта- лон	Состав	t_1	Состав	t_3	Состав	t_4
Компонент	Дози- ровка, кг/м ³	Компонент	Дози- ровка, кг/м ³	Компонент	Дози- ровка, кг/м ³	Компонент	Дози- ровка, кг/м ³
Nanodur 5941	1050	ПЦ ЦЕМ 0 52,5Н	563	ПЦ ЦЕМ 0 52,5Н	1050	ПЦ ЦЕМ 0 52,5Н	840
Песок фр 0-0.63	215	МК85	56	МК85	0	МК85	0
Песок фр. 0.63-2.5	215	Маршалит	431	Микрокаль-цит	0	Микрокаль-цит	210
Гранитн. за- полнитель фр. 2.5-5	880	Песок фр 0-0.63	215	Песок фр 0-0.63	258	Песок фр 0-0.63	258
Melflux 5581F	10.50	Песок фр. 0.63-2.5	215	Песок фр. 0.63-2.5	172	Песок фр. 0.63-2.5	172
Вода	180	Гранитн. за- полнитель фр. 2.5-5	880	Гранитн. за- полнитель фр. 2.5-5	880	Гранитн. за- полнитель фр. 2.5-5	880
		Melflux 5581F	5.63	Sika 226-p	10.50	Sika 226-p	8.40
		Вода	237	Вода	242	Вода	226.47 05882
В/Ц	0.290	В/Ц	0.420	В/Ц	0.231	В/Ц	0.270
В/Т	0.076	В/Т	0.100	В/Т	0.103	В/Т	0.096

И _{цд}	3.203	И _{цд}	3.633	И _{цд}	3.448	И _{цд}	3.427
И _{цдп}	2.054	И _{цдп}	2.318	И _{цдп}	2.238	И _{цдп}	2.224
Состав	т5	Состав	т6	Состав	т7	Состав	т8
Компонент	Дози- ровка, кг/м ³	Компонент	Дози- ровка, кг/м ³	Компонент	Дози- ровка, кг/м ³	Компонент	Дози- ровка, кг/м ³
ПЦ ЦЕМ 0 52,5Н	734	ПЦ ЦЕМ 0 52,5Н	300	ПЦ ЦЕМ 0 52,5Н	517	ПЦ ЦЕМ I 42,5Н	734
МК85	59	МК85	24	МК85	41	МК85	59
Микрокаль- цит	190	Микрокаль- цит	659	Микрокаль- цит	425	Микрокаль- цит	190
Песок фр 0- 0.63	244	Песок фр 0- 0.63	244	Песок фр 0- 0.63	244	Песок фр 0- 0.63	244
Песок фр. 0.63-2.5	162	Песок фр. 0.63-2.5	162	Песок фр. 0.63-2.5	162	Песок фр. 0.63-2.5	162
Гранитн. за- полнитель фр. 2.5-5	831	Гранитн. за- полнитель фр. 2.5-5	831	Гранитн. за- полнитель фр. 2.5-5	831	Гранитн. за- полнитель фр. 2.5-5	831
Sika 226-р	7.93	Sika 226-р	3.00	Sika 226-р	5.17	Sika 226-р	7.93
Вода	214	Вода	199	Вода	211	Вода	214
В/Ц	0.291	В/Ц	0.665	В/Ц	0.409	В/Ц	0.291
В/Т	0.096	В/Т	0.090	В/Т	0.095	В/Т	0.096
И _{цд}	3.440	И _{цд}	3.502	И _{цд}	3.500	И _{цд}	3.440
И _{цдп}	2.226	И _{цдп}	2.249	И _{цдп}	2.252	И _{цдп}	2.226

Из экспериментальных составов формовались контрольные образцы. Образцы изготавливали методом ручного перемешивания в лабораторной чаше затворения. Первоначально производили перемешивание сухих компонентов до однородности цвета сухой смеси, затем происходило одностадийное затворение водой с растворенной пластифицирующей добавкой. Виброуплотнение при формовании не применялось.

3.2.1 Модифицирование составов и выработка механизмов эффективного регулирования вибродемпфирующих показателей

Исследовано влияние расхода цемента на вибродинамические показатели гетерогенного материала. С учетом трудности описания механизмов формирования вибродинамических показателей материалов с жесткофиксированными структурными связями на первом этапе использовали методологию черного ящика в качестве инструментария выявления характера закономерностей «компонент рецептуры-свойство».

Исследовалось влияние удельного расхода цемента на кинетику изменения статического и динамического модулей упругостей, а также логарифмический декремент затухания ВФСУБ. Статический модуль упругости E определялся по схеме испытаний 3, и

динамический E_d – по схеме 1 (рисунок 54). Опыты проводили на образцах ВФСУБ следующего компонентного состава: портландцемент – 300–734 кг/м³; микрокремнезём – 10 % от массы ПЦ; песок (фр. 0,16–0,63) – 244 кг/м³, то же (фр. 0,63–1,25) – 163 кг/м³, гранитный заполнитель (фр. 2,5–5) – 831 кг/м³, пластификатор – 0,8 % от массы ПЦ, мраморная мука – 190–660 кг/м³ (использовалась в качестве замещения части цемента для сохранения общей доли порошковых компонентов). Величина В/Т отношения в смесях составляла 0,090–0,095 и корректировалось для обеспечения расплыва (290 ± 5) мм.



Рисунок 54 – Процесс испытания образцов ВФСУБ:

1 – образец на опорах; 2 – консольное закрепление; 3 – статический изгиб

Исследованы три экспериментальные серии (по шесть образцов) со следующими характеристиками: состав 1 (Ц=300 кг/м³; $R_{сж}^1=25,6$ МПа; $R_{из}^1=4,37$ МПа; $R_{сж}^{28}=73,3$ МПа; $R_{из}^{28}=9,79$ МПа), состав 2 (Ц=517 кг/м³; $R_{сж}^1=39,8$ МПа; $R_{из}^1=6,63$ МПа; $R_{сж}^{28}=103,4$ МПа; $R_{из}^{28}=15,37$ МПа), состав 3 (Ц=734 кг/м³; $R_{сж}^1=61,5$ МПа; $R_{из}^1=8,25$ МПа; $R_{сж}^{28}=131,2$ МПа; $R_{из}^{28}=16,49$ МПа) (рисунок 55).

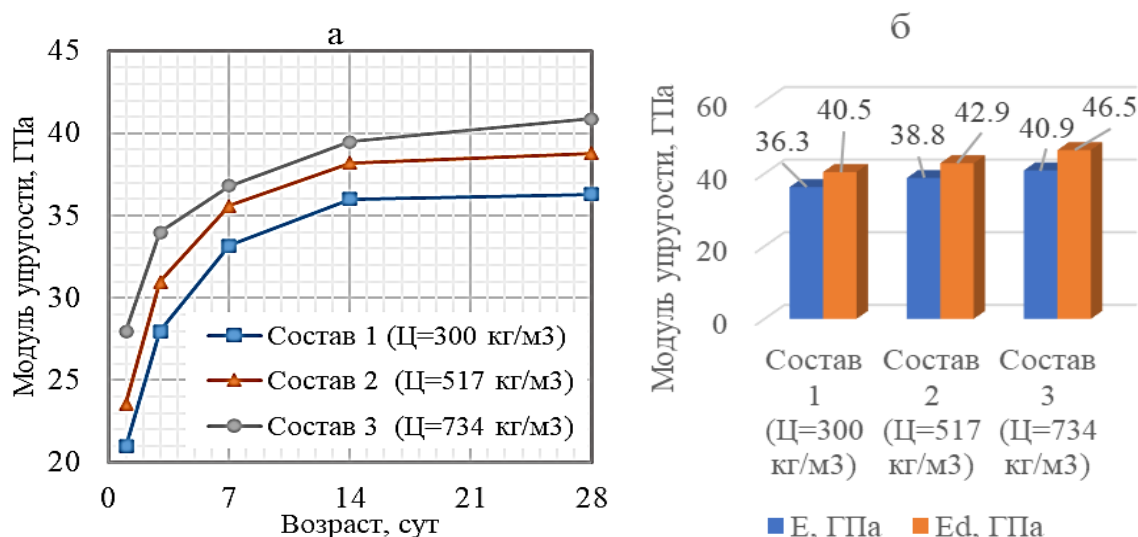


Рисунок 55 – Влияние расхода цемента на деформативность бетона:

а – изменение модуля упругости бетона при твердении;

б – статический и динамический модуль упругости (28 суток твердения в н.у.)

При определении E_d фиксируемые частоты всех образцов находились в диапазоне 1000–1300 Гц. Вычисленное отношение E_d/E после 28 суток твердения составило для составов №1, №2 и №3 – 1,115, 1,105 и 1,137 соответственно. Логарифмические декременты затухания экспериментальных образцов показаны на рисунке 56.

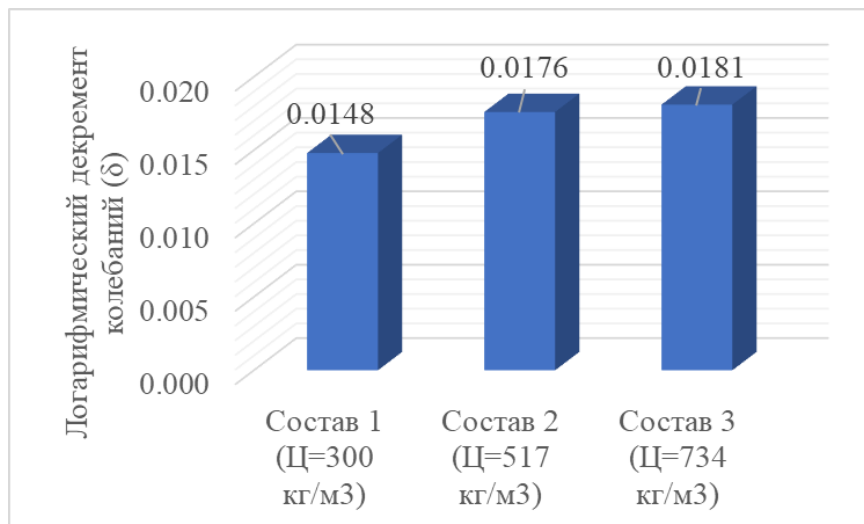


Рисунок 56 – Логарифмический декремент затухания образцов бетона с различным содержанием цемента (180 суток твердения в н.у.)

Максимизация величины δ является важным критерием оптимизации проектируемых составов ВФСУБ, поскольку декремент затухания напрямую влияет на динамическую податливость вибронагруженных промышленных конструкций при резонансе [114].

Данные на рисунке 56 позволили установить зависимость величины δ от удельного расхода Ц в бетоне. С увеличением содержания цемента с 300 до 734 кг/м³ повышение величины δ составляет 1,22 раза. Очевидно, это связано со снижением объёмной доли кристаллических фаз в бетоне вследствие замещения части мраморной муки, состоящей из кристаллического кальцита, цементным камнем, включающим слабозакристаллизованные гелевые фазы. Определенный вклад в наблюдаемый эффект вносит также повышение степени гетерогенности микроструктуры матрицы 2-го уровня. Согласно эмпирическому правилу увеличение количества поверхностей и зон новых контактов различной степени сформированности, а также общей фрактальности микроструктуры затрудняет процесс прохождения волн различной природы. Известно, что при гидратации цемента образуются древовидные разветвленные структуры, постепенное переплетение отдельных элементов которых и составляет основу феномена нарастания прочности твердеющего портландцемента. В данном случае отдельные нитевидные новообразова-

ния можно рассматривать как своеобразные резонаторы, размерно-геометрические параметры которых, а также взаимное расположение в теле бетона неодинаковы. При их включении в работу (при наличии внешнего циклического воздействия) это приводит к взаимному наложению механических колебаний с эффектом деструктивной интерференции, поскольку излучаемые ими волны различаются по амплитуде, частоте и поляризации. Сравнительно низкое демпфирование в кристаллических веществах, структура которых отличается малым количеством дефектов, доказана большим количеством фундаментальных исследований [57].

Для определения влияния частоты на динамический модуль упругости использовалась консольная схема (рисунок 33). Первая собственная частота изгибных колебаний f регулировалась путём изменения вылета образцов состава 2. В эксперименте его величина изменялась от 70 до 180 мм, что позволило задавать частоту от 3868 до 578 Гц (рисунок 57).

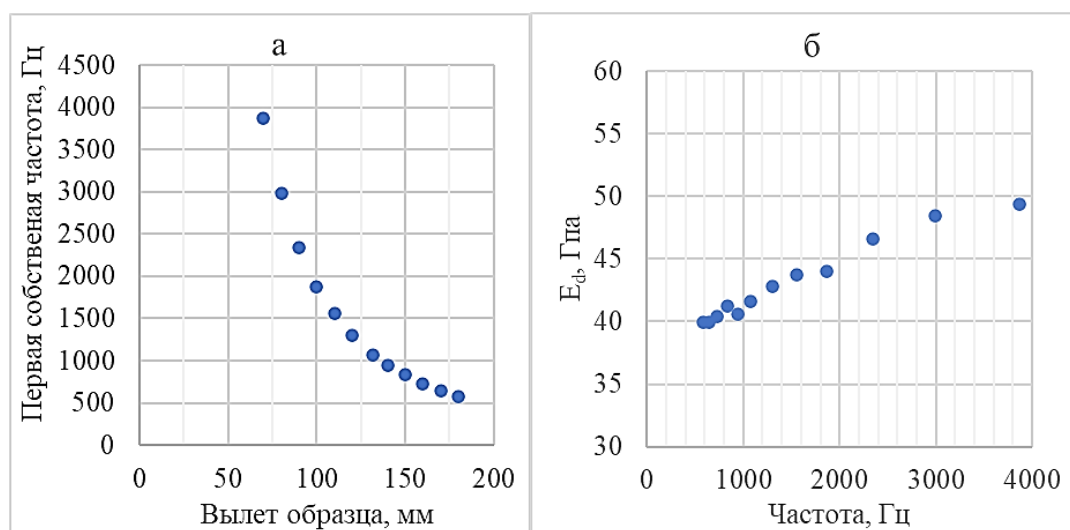


Рисунок 57 – Вибродинамические характеристики ВФСУБ:

а – влияние величины вылета образца на частоту колебаний;

б – влияние частоты на динамический модуль упругости бетона

Исследование влияния материала растворной части на вибродинамические показатели строительных конгломератов приведено на примере полимерного бетона, рецептура которого повторяет состав «Синтегран». В качестве вяжущего для полимербетона использован эпоксидный трехкомпонентный компаунд Смэл 04-25, состоящий из смолы, отвердителя и кварцевого минерального наполнителя (соотношение смола: наполнитель=1:2 (по массе)).

На диаграмме рисунок 58, построенной по результатам собственных испытаний цементных и полимерных бетонов, визуализирована взаимосвязь деформативных и демпфирующих свойств.

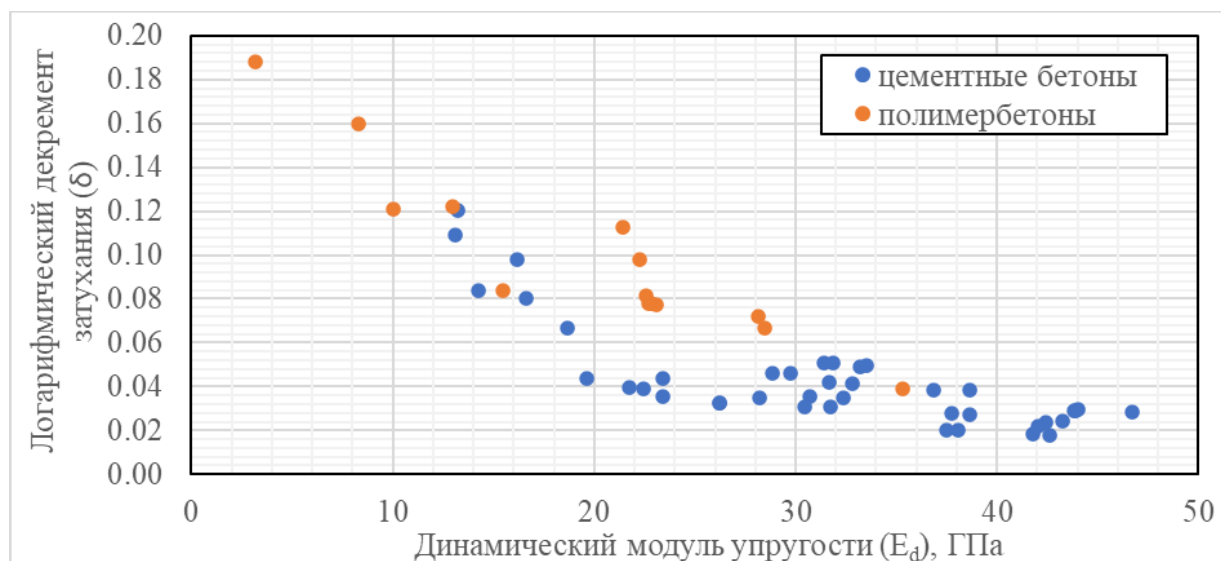


Рисунок 58 – Диаграмма деформативных и демпфирующих свойств бетонов на различных вяжущих

Усредненные экспериментальные данные демонстрируют обратную зависимость показателей демпфирования от динамического модуля упругости материала. Однако в рамках отдельных рецептов имеется возможность существенного изменения соотношения между демпфирующими и деформативными характеристиками бетона. Это позволяет решать задачи оптимизации ВФСУБ по заранее заданным вибродинамическим показателям.

Подобные диаграммы целесообразно использовать в различных областях материаловедения на этапах определения направления исследований [2, 115] или выбора конструкционного материала под конкретную вибронагруженную промышленную конструкцию [5].

Результаты, полученные по разработанному методу, и дополненные данными численного моделирования формируют экспериментально-расчетный подход к прогнозированию поведения бетонных конструкции при вибродинамическом воздействии. Эффективность такого подхода показана в ряде опубликованных исследований [2, 59], приведенных и систематизированных в главе 1 диссертационной работы.

Метод апробировался и показал эффективность при исследовании динамических характеристик конструкционных материалов различной природы: высокопрочный тяжелый бетон, бетон на пористых заполнителях, реакционно-порошковый бетон, полимер-

бетон (синтегран), стеклопластик, полиметилметакрилат, углеродистая сталь, серый чугун, дюралюминий, древесина (рисунок 59).



Рисунок 59 – Примеры экспериментальных образцов конструкционных материалов

Результаты, полученные по разработанному методу, и дополненные данными численного моделирования формируют экспериментально-расчетный подход к прогнозированию поведения бетонных конструкции при вибродинамическом воздействии. Эффективность такого подхода показана в ряде опубликованных исследований [2, 59], приведенных и систематизированных в главе 1 диссертационной работы.

3.2.2 Химическое аппретирование поверхности зерен инертной части

Химическое аппретирование поверхности зерен инертной части проводили на различных типах материала. Целью исследований этого этапа стала оценка влияние плотности ядра заполнителя на динамические свойства мелкозернистого бетона. В качестве заполнителя использовались: дроблёный гранит ($\rho_{\text{ср}}=2593 \text{ кг/м}^3$) со средним размером зёрен 5,9 мм; дроблёное оптическое стекло ($\rho_{\text{ср}}=5306 \text{ кг/м}^3$) со средним размером зёрен 7,1 мм; чугунная дробь ($\rho_{\text{ср}}=7085 \text{ кг/м}^3$) со средним размером зёрен 5,9 мм. Общий вид заполнителей приведён на рисунке 60.



Рисунок 60 – Вид частиц заполнителя до модификации:

а – гранит; б – оптическое стекло; в – чугунная дробь

На поверхности заполнителей формировалась силиконовое однослойное покрытие со средней толщиной 0,3 мм (рисунок 61).



Рисунок 61 – Вид частиц заполнителя с силиконовым покрытием:

а – гранит; б – оптическое стекло; в – чугунная дробь

Влияние силиконового покрытия на среднюю плотность заполнителя показано на рисунке 62.

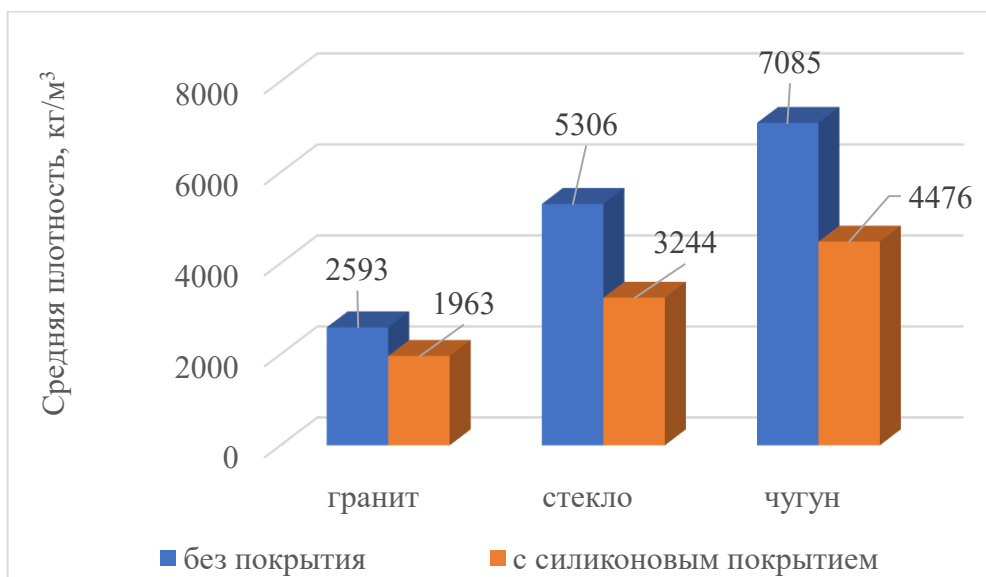


Рисунок 62 – Влияние силиконового покрытия на среднюю плотность заполнителя

В качестве вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ 0 52,5Н с добавлением мраморной муки (ММ) в количестве 0,4 от массы Ц. Содержание кварцевого песка по массе составляло 1,5(Ц+ММ). Объемное содержание заполнителя фракции 5–10 мм во всех составах находилось на уровне 7 %. В качестве контрольного использования состав без силиконового покрытия заполнителя фракции 5–10 мм. В экспериментальных составах происходило замещение всего объема гранитного заполнителя фр. 5–10 мм на гранитный, стеклянный и чугунный заполнитель с покрытием.

Образцы выдерживались при нормальных условиях в течение семи суток, после чего определялся их динамический модуль упругости и логарифмический декремент (рисунок 63).

Результаты определения вибродинамических характеристик для образцов, содержащих стеклянные и чугунные заполнители, свидетельствуют об отсутствии влияния средней плотности. Свойства образцов с гранитным заполнителем (отличается большей лещадностью зёрен) несколько отличаются, особенно после семи суток твердения. Это выражается в снижении модуля упругости и повышении величины демпфирования, что можно объяснить большей дефектностью структуры.

Результаты определения вибродинамических характеристик для образцов, содержащих стеклянные и чугунные заполнители, свидетельствуют об отсутствии прямого влияния средней плотности на исследуемые показатели.

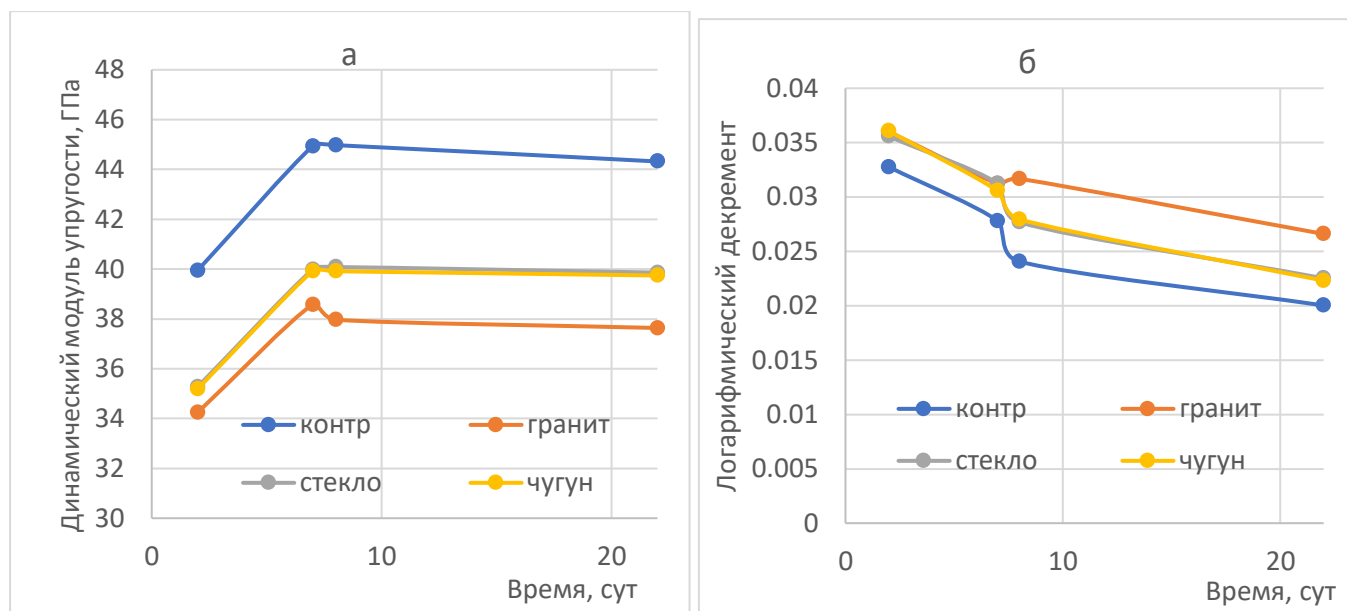


Рисунок 63 – Динамический модуль упругости (а) и логарифмического декремента затухания (б) образцов мелкозернистого бетона с инерционными демпферами

Таким образом, изменение средней плотности сердечника заполнителей-демпферов в три раза ($2410\text{--}7725\text{ кг/м}^3$) при их объёмном содержании на уровне 7 % сопровождается ростом вибродемпфирующих показателей бетона на 10 %. Гораздо заметнее влияние формы частиц: образцы с гранитным заполнителем-демпфером, отличающимся большей лещадностью, показали рост величины демпфирования на 20 % относительно стеклянного аналога (при сопоставимом изменении E_d). Это можно объяснить большей дефектностью макроструктуры и увеличением общей площади контакта «растворная часть – модифицированная поверхность заполнителя-демпфера».

3.2.3 Влияние дисперсного армирования и добавки суперабсорбирующего полимера на свойства высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов

При изготовлении железобетонных изделий специального назначения, включая вибронагруженные промышленные конструкции, стальные волокна выступают в качестве конкурирующей альтернативы обычной арматуре. Принятие проектного решения зависит от суммарного эффекта, обусловленного соотношением выигрыша от рационализации технологии изготовления и повышения эксплуатационных свойств бетона с одной стороны и повышения затрат на компоненты состава с другой. В аспекте силовых бетонных конструкций основная цель дисперсного армирования – улучшение механических характеристик материала за счет способности волокон перекрывать микротрещины, изменяя характер разрушения, повышая его прочность и стойкость к знакопеременным динамическим нагрузкам.

По опубликованным данным использование тонких и коротких металлических волокон ($l/d=30-60$) в дисперсно-армированных бетонах обеспечивает равномерное улучшение эксплуатационных характеристик по всему объему конструкции. При этом стоимость таких бетонов в 1,5–1,8 раза выше бетонов классов В30–В50, но снижение объема бетона в конструкциях в 4–6 раз позволяет снизить расход составляющих бетона в 2–3 раза [116, 117].

Исходя из вышеизложенного, получение дисперсно-армированных ВФСУБ с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками, позволит расширить области их применения за счет сфер вибронагруженных конструкций промышленного назначения и станкостроения. С учетом существенного повышения себестоимости составов таких видов ВФСУБ, актуальная цель заключается в нахождении рецептурных решений, снижающих затраты на неметаллические компоненты бетонной смеси. Очевидный способ ее достижения – максимизация использования сырьевых материалов местного и российского производства.

В связи с этим целью данного раздела работы являлось получение и исследование свойств дисперсно-армированного ВФСУБ на основе местного высокомарочного цементного вяжущего и компонентов отечественного производства – минеральных наполнителей, пластифицирующих добавок, стальных волокон.

При изготовлении экспериментальных образцов использовали стальную волнистую микрофибру размерами $15 \times 0,2$ мм с дозировкой от 1 до 3 % от объёма бетонной смеси. Для всех составов соблюдались одинаковые водоцементное и водотвердое отношения.

Приготовление сухой смеси осуществлялось путем тщательного перемешивания компонентов в турбулентной высокоскоростной мешалке в течение 10 мин при 600 об/мин до полной гомогенизации массы. После получения однородной смеси производилось ее одностадийное затворение водой, содержащей отмеренное количество пластифицирующей добавки. Образцы формовали способом свободной заливки без дополнительного уплотнения на виброплощадке.

Оптимизацию бетонной смеси и бетона проводили, исходя из необходимости выполнения нормативных требований к УНРС. Согласно нормам ЕС растекаемость бетонной смеси из конуса Хагерманна должна превышать 250 мм, при сохранении показателей высокой плотности и ранней прочности, а также устойчивости к расслоению.

Учитывая значительное влияние порядка введения компонентов на показатели фибробетонной смеси при перемешивании придерживались единого разработанного варианта последовательности, который позволил избежать последствий, связанных со склонностью фибры к комкообразованию.

Известно, что локальная концентрация волокон приводит к структурной неоднородности дисперсно-армированного ВФСУБ и нивелирует все потенциально возможные положительные эффекты [118]. Оценку степени однородности распределения фибры определяли путем осмотра поверхностей изломов образцов, испытанных на изгиб (рисунок 64).



Рисунок 64 – Вид поверхности излома дисперсно-армированного бетона

Сведения о проектируемых составах дисперсно-армированных ВФБ приведены в таблице 20.

Растекаемость бетонной смеси оценивали по диаметру расплыва конуса с размерами 100×70×60 мм. При этом вычислялся показатель относительной степени растекания (Γ) (см. главу 2).

В ходе экспериментов выявлена значительная потеря растекаемости с увеличением содержания фибры: при ее дозировке 2 % смесь перестает быть самоуплотняющейся, а при повешении до 3 % растекаемость отсутствует (рисунок 65).

Таблица 20 – Составы дисперсно-армированного ВФСБ

Наименование компонентов	Номер состава			
	Контрольный	1	2	3
	Масса компонентов, кг			
ПЦ ЦЕМ 0 52,5Н	734	734	732	732
Микрокремнезем МК-85	59	59	59	58,7
Микрокальцит	190	190	189	189
Песок фр. 0–0,63	244	243	243	243
Песок фр. 0,63–2,5	162	162	162	162
Гранитный заполнитель фр. 2,5–5 мм	831	830	829	829
ГП Sika 226-P	7,93	7,93	8	7,91
Вода	214	214	213	213
Фибра стальная (% от $V_{б,см}$)	-	78 (1 %)	156 (2 %)	234 (3 %)
В/Ц	0,291	0,29	0,29	0,29
В/Т	0,096	0,093	0,090	0,087
$I_{цд}$	3,44	3,44	3,44	3,44
$I_{цдп}$	2,23	2,23	2,23	2,23
$D_{распл}$, мм	290	262	170	0
Степень растекания (Γ), мм ²	7,41	5,86	1,89	-

Формы с бетонной смесью помещали в камеру с нормальными температурно-влажностными условиями. По истечении 24 часов твердения контрольные образцы распалубливали, часть испытывали на первые сутки, а остальные помещали обратно в камеру нормального твердения до достижения срока испытаний – 7 и 28 суток.

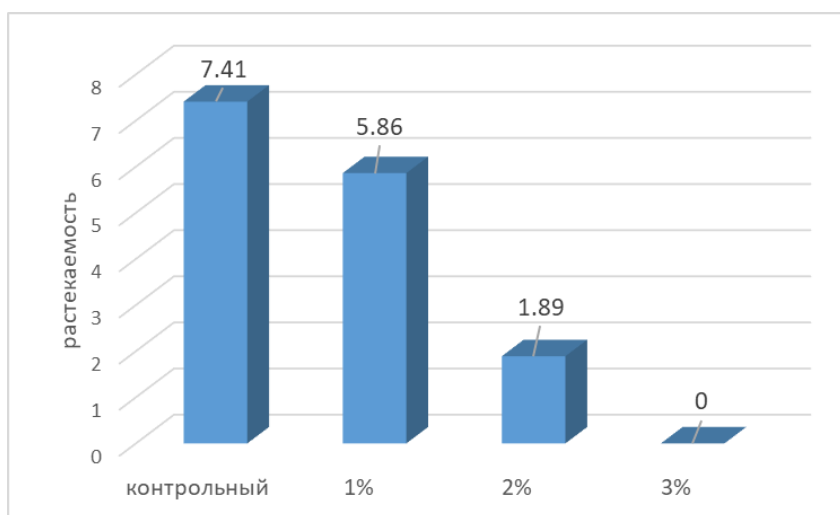


Рисунок 65 – Относительная степень растрескивания дисперсно-армированного ВФСУБ

Данные по показателям прочности контрольных образцов приведены на рисунке 66.

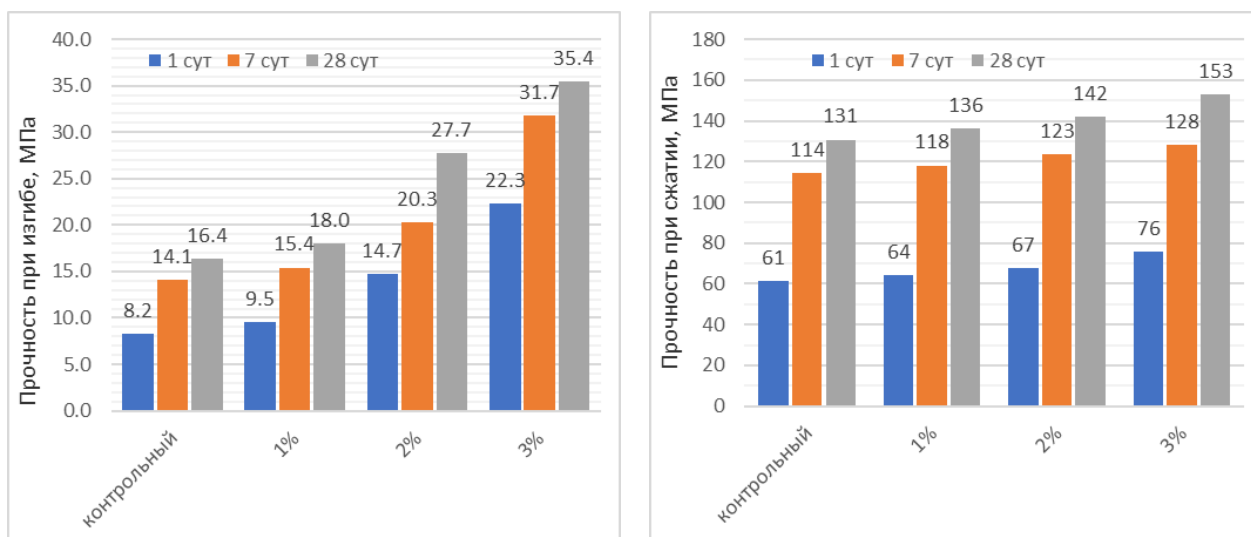


Рисунок 66 – Влияние содержания стальной фибры и сроков твердения на прочность дисперсно-армированного ВФСУБ

Результаты исследований показали, что 3%-е армирование фибробетона приводит к росту прочности на сжатие через 28 суток на 16,8 %. Отмечена высокая начальная прочность (через одни сутки) на осевое сжатие у состава с 3 % волокон фибробетона – 76 МПа, что на 24,6 % выше, чем у контрольного состава. С увеличением содержания стальных волокон дисперсно-армированные бетоны показывают более высокие значения прочности на изгиб на всех сроках твердения.

Параллельно исследовали деформативные показатели составов. На рисунке 67 представлена кинетика изменения модуля упругости при твердении. Наилучшие резуль-

таты показывает ВФСУБ с дозировкой фибры 3 %: в 28-суточном возрасте модуль упругости превышает контрольный на 23 %.

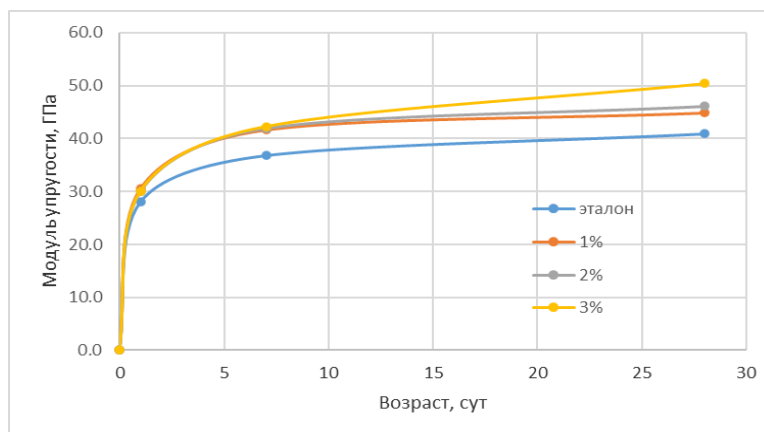


Рисунок 67 – Влияние стальной фибры на модуль упругости дисперсно-армированного ВФСУБ

Повышение дозировки волокон закономерно сопровождается ростом средней плотности составов, достигая максимального значения 4,6–6,3 % (рисунок 68).

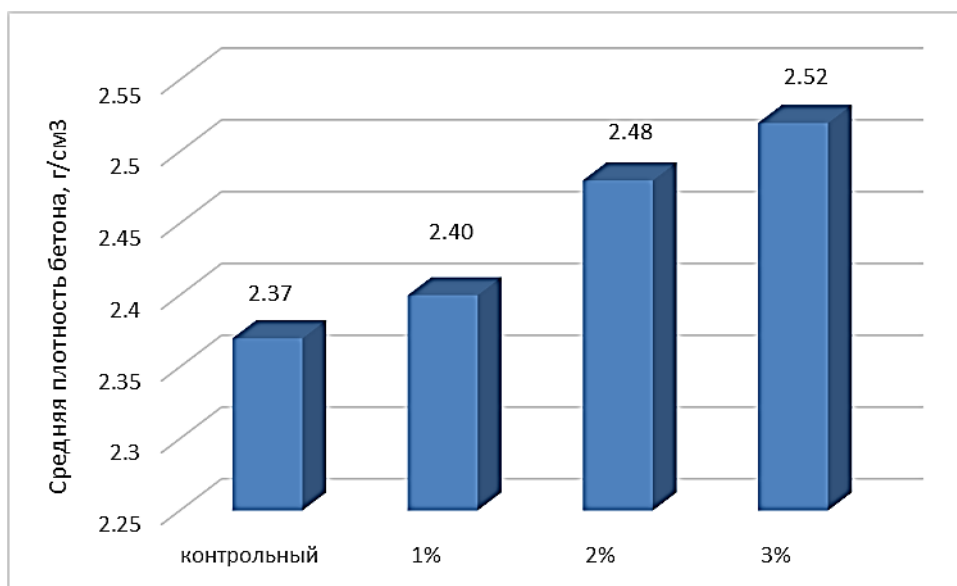


Рисунок 68 – Средняя плотность дисперсно-армированного ВФСУБ

Таким образом, в ходе проведенных экспериментов получены высокопрочные дисперсно-армированные ВФСУБ на основе отечественных компонентов. На протяжении всего периода твердения (1–28 суток) при увеличении в составе ВФСУБ содержания волокон от 0 до 3 % наблюдается рост прочности на сжатие со 136 до 153 МПа и на изгиб (с 18 до 35,4 МПа).

Относительно невысокий эффект увеличения механических показателей объясняется тем, что использование фибры с геометрическим фактором $l/d=80-120$ не обеспечивает ее достаточную анкеровку в бетонной матрице. Это приводит к тому, что

разрушение сталефибробетонных образцов сопровождается не разрывом материала волокон, а их выдергиванием при гораздо меньшем механическом нагружении.

Учитывая более хрупкий характер разрушения высокопрочных бетонов, исследовано влияние армирующих компонентов на вибродинамические показатели бетона. Эксперименты проводили на образцах, содержащих от 0 до 2 % стеклянных, стальных и полимерных (полипропиленовых) волокон (по объему) (рисунок 69).



Рисунок 69 – Вид волокон (слева направо): стеклянные, стальные и полимерные

Водоцементное отношение всех составов находилось в диапазоне 0,34–0,35 (при В/Т 0,110–0,114). Характер влияния дисперсного армирования на вибродинамические показатели приведен на рисунке 70.

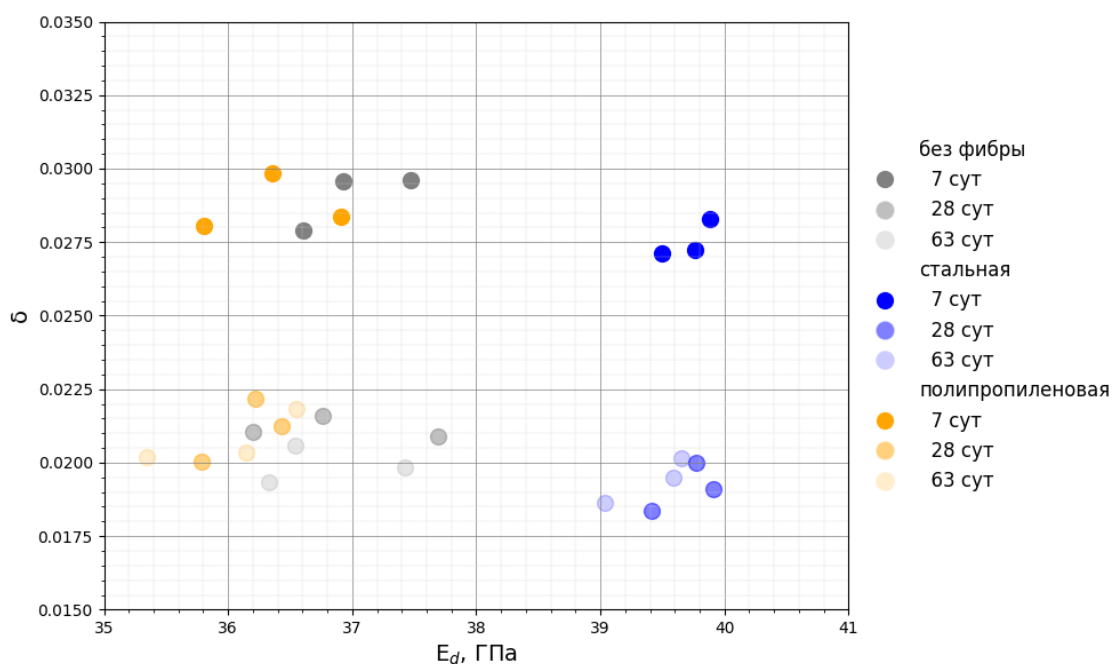


Рисунок 70 – Влияние дисперсного армирования на вибродинамические показатели

Анализ данных показывает, что введение полимерной фибры приводит к незначительному снижению величины E_d при неизменной величине демпфирования, а стальной фибры – повышает E_d , снижая величину δ .

3.2.4 Оптимизация режимов твердения

Влияние температуры и влажности на усадку модифицированных составов исследовали на примере добавки бутилцеллозоля (рисунок 71). После прохождения начальной усадки в воздушно-сухих условиях образцы подвергали двухступенчатой сушке: на первом этапе при температуре 65 °С, на втором – при 105 °С. По окончании каждого этапа сушки образцы термостатировали в условиях, исключающих массообмен с окружающей средой, а затем измеряли их деформацию.

Установлено, что увеличение содержания бутилцеллозоля приводит к снижению деформации усадки образцов на воздухе и после сушки при 65 °С. Сушка при температуре 105 °С приводит к выравниванию усадочных деформаций образцов.

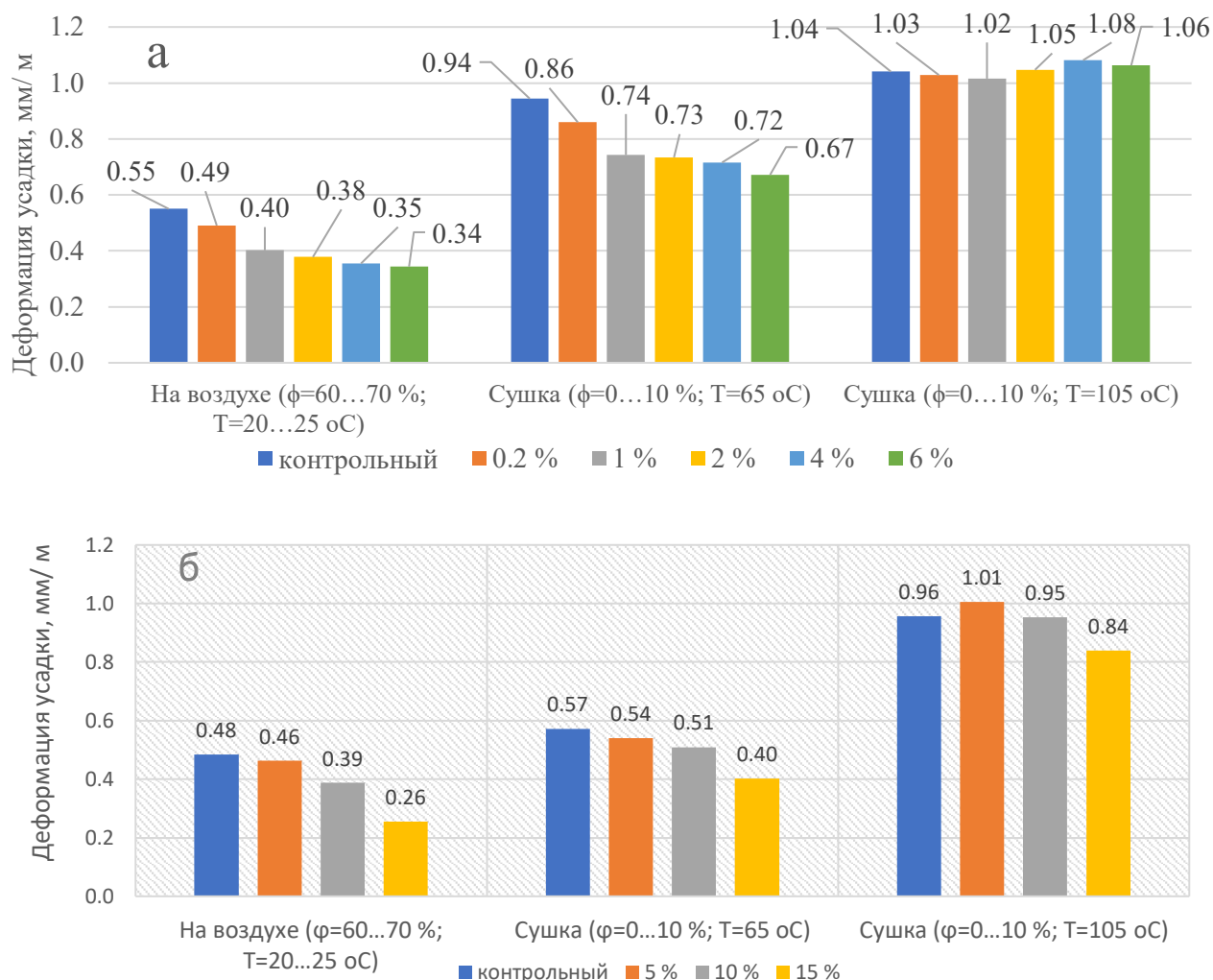


Рисунок 71 – Влияние температурно-влажностных условий на усадку образцов с добавками: а – бутилцеллозоль; б – Denka CSA20

Имеющиеся литературные данные свидетельствуют о влиянии автоклавной обработки на свойства высокопрочного бетона. Однако эти данные достаточно противоречивы. В работе Дж. Хэнсона [119] было показано, что автоклавная обработка при температуре 175 °С в 3–4 раза снижает влажностную усадку и ползучесть бетона, при этом повышается прочность и модуль упругости. Исследование [120] показывает, что обработка бетона горячим паром приводит к снижению модуля упругости и повышению демпфирования. Согласно [121] автоклавирование сверхвысококачественного бетона (УНРС) при температуре 200 °С привела к повышению прочности при сжатии, однако прочность при изгибе значительно снизилась.

В настоящей работе для исследования влияния различных видов тепловлажностной обработки на механические показатели бетона использовались два состава: состав I – содержащий ПЦ, МК (10 % от Ц), кварцевую муку (0,3 от Ц), кварцевый песок (при отношении П/Ц 2:1), пластификатор (0,8 % от Ц); состав II отличался отсутствием микрокремнезёма, замещённого дополнительной долей кварцевой муки. В/Ц для обоих составов составляло 0,33 ($V/T = 0,1$). Смешивание компонентов осуществлялась в лабораторной чаше ручным способом, пластификатор вводился с водой затворения. Предельное напряжение сдвига составило 3,23 Па – для состава I и 3,14 Па – для состава II.

После формования образцы выдерживались одни сутки в камере нормального твердения при температуре 20–23 °С и относительной влажности 95–99 %, после распаковки образцы делились на серии. Автоклавная обработка образцов осуществлялась в возрасте 24 часа в лабораторном автоклаве при максимальной температуре 140 °С и давлении 4 атм. Режимы обработки представлены на рисунке 72.

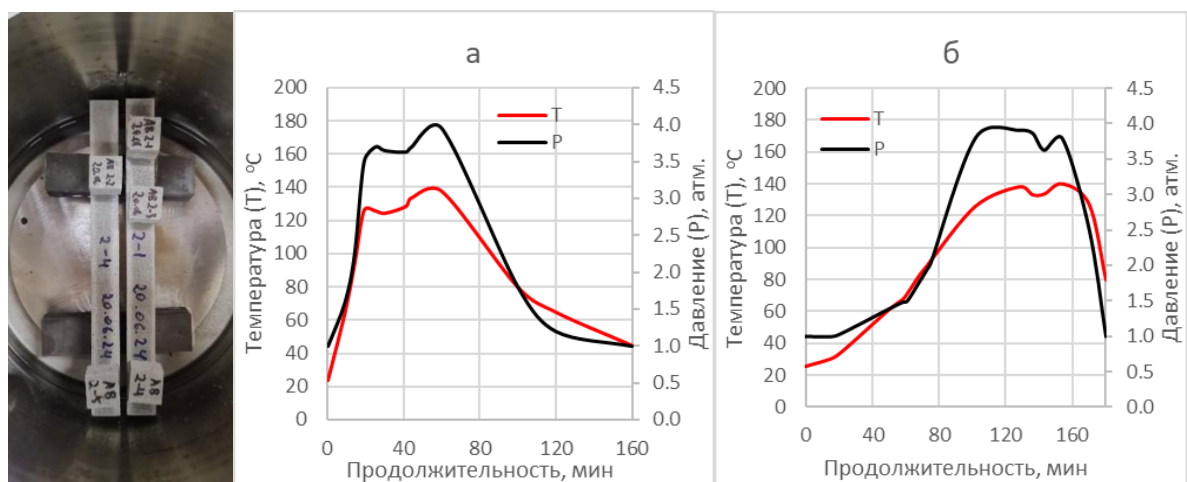


Рисунок 72 – Экспериментальные образцы и параметры автоклавной обработки:

а – режим 1; б – режим 2

Тепловлажностная обработка (пропаривание) осуществлялась путём нагрева образцов, завернутых во влажную ткань и несколько слоёв полимерной плёнки в соответствии со следующим режимом: 1 фаза – подъём температуры до 70 °С в течение 40 минут; 2 фаза – изотермическая выдержка в течение двух часов, а затем плавное охлаждение в течение примерно трех часов. После указанных процедур образцы помещались в камеру нормального твердения (н.у.). Контрольные образцы каждого состава после распалубки оставляли в камере. После семи суток нормального твердения образцы извлекались из камеры. Деформации образцов определялись на всём протяжении после распалубки. Результаты представлены на рисунке 73.

Наблюдается снижение величины предельной усадки у образцов с МК, подвергшихся автоклавной обработке (рисунок 73 а) – снижение усадки в 1,27 раза. У образцов без добавки микрокремнезёма (рисунок 73, б) пропаривание не оказало заметного влияния на усадку, а автоклавная обработка способствовала её снижению в 1,57 раза.

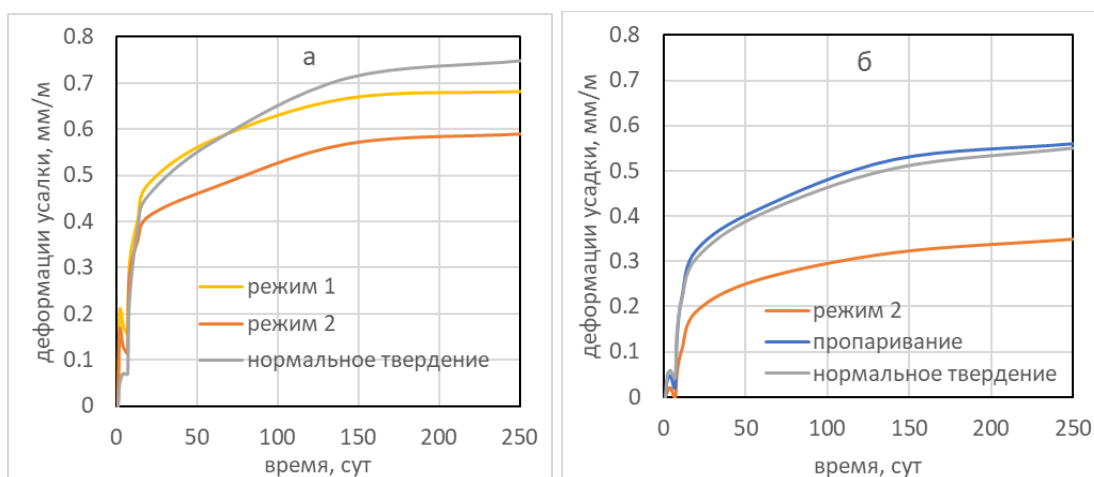


Рисунок 73 – Результаты определения усадки образцов при различных условиях:

а – I состав; б – II состав

Следующим этапом являлось определение динамических характеристик (рисунок 74).

Наибольшая величина модуля упругости для состава с микрокремнезёмом зафиксирована у образцов после автоклавной обработки по режиму 2. У бездобавочных составов автоклавная обработка и пропаривание также вызывают незначительное повышение модуля упругости. Прочность при сжатии (R_{28}) (состав I) составляет 80, 88 и 81 МПа при автоклавной обработке по режиму 1, 2 и твердении при н.у. соответственно. При быстром подъёме температуры (режим 1) наблюдается снижение E_d и повышение демпфирования, что свидетельствует о росте дефектности структуры материала.

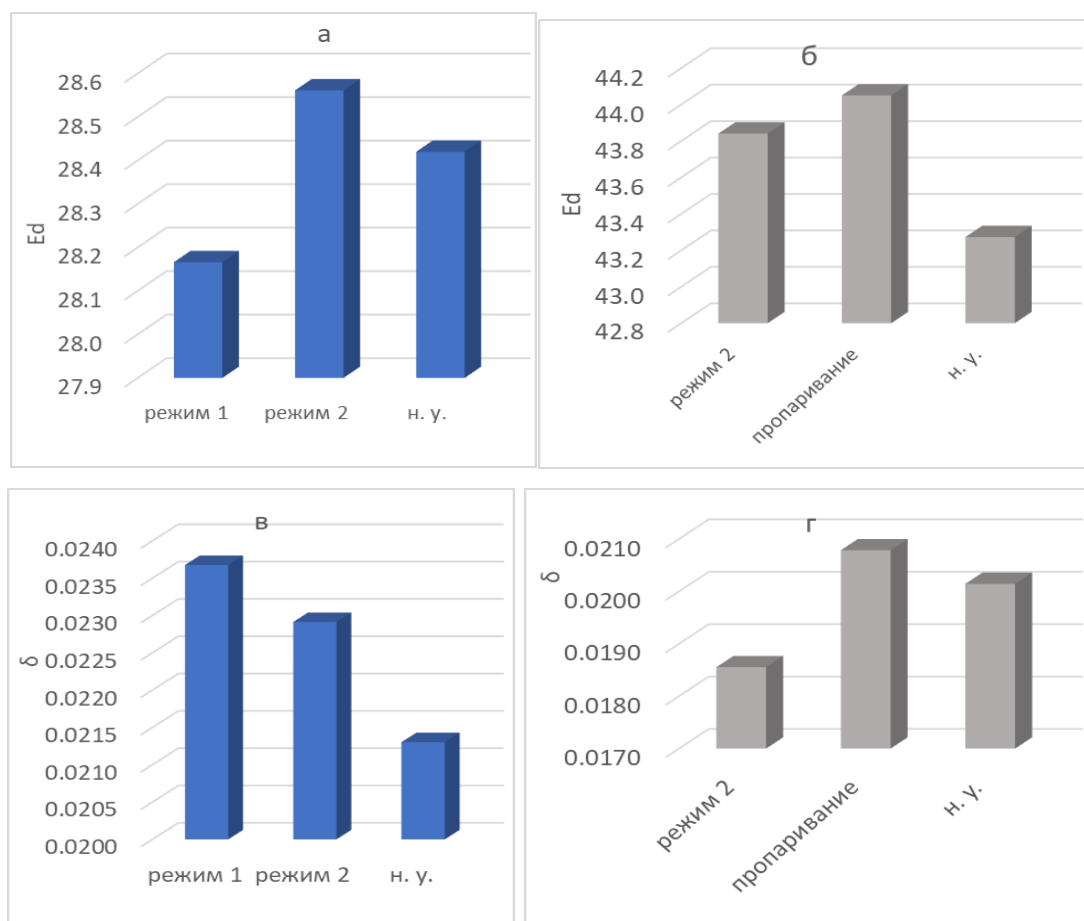


Рисунок 74 – Динамический модуль упругости (E_d) и логарифмический декремент колебаний (δ) экспериментальных образцов: а, в – состав I; б, г – состав II

Оптимальные составы разработанных бетонов различного назначения приведены в таблицах 21 и 22.

Таблица 21 – Оптимальные составы и свойства дисперсно-армированного ВФСУБ

Наименование компонентов	Номер состава	
	1	2
ПЦ ЦЕМ 0 52,5Н	734	732
Микрокремнезем МК85	59	59
Микрокальцит	190	189
Песок фр. 0–0,63	243	243
Песок фр. 0,63-2,5	162	162
Гранитный заполнитель фр. 2,5–5 мм	830	829
ГП Sika 226-P	7,93	8
Вода	214	213
Фибра стальная (% от V)	78 (1 %)	156 (2 %)
В/Ц	0,29	0,29

В/Т	0,093	0,090
Показатели свойств	Номер состава	
	1	2
$I_{цд}$	3,44	3,44
$I_{цдп}$	2,23	2,23
$D_{распл}$, мм	262	170
Степень растекания (Г), мм ²	5,86	1,89
Средняя плотность, кг/м ³	2390	2470
Прочность (1 сут.), МПа:		
- сжатие	60,7	59,4
- изгиб	8,84	13,63
Прочность (28 сут.), МПа:		
- сжатие	122	119
- изгиб	15,4	25,0
Модуль упругости (28 сут.), ГПа:		
- статический	41,9	42,9
- динамический	46,1	47,3
Логарифмический декремент (28 сут.)	0,0176	0,0170
Деформация усадки, мм/м	0,41	0,34

Таблица 22 – Составы и свойства бетонов машиностроительного назначения

Наименование компонентов	Номер состава			
	1	2	3	4
ПЦ ЦЕМ 0 52,5Н	734	517	612	612
Микрокремнезем МК85	59	41	-	-
Микрокальцит	190	425	-	-
Кварцевая мука silverbond 15ew	-	-	302	233
Песок фр. 0-0,63	244	244	-	-
Песок фр. 0.63-2,5	162	162	-	-
Песок Мкр 2,33	-	-	1224	1224
Гранитный заполнитель фр. 2,5-5 мм	831	831	-	-
Бутилцеллозольв	-	-	7,34	7,35
Denka CSA 20	-	-	4,2	73
ГП Sika 226-P	8	5	4,9	4,9
Вода	214	211	214	214
В/Ц	0,29	0,41	0,35	0,35

В/Т	0,096	0,095	0,1	0,1
Показатели свойств	Номер состава			
	1	2	3	4
$I_{цд}$	3,44	3,50	1,14	1,14
$I_{цдп}$	2,23	2,25	-	-
$D_{распл}$, мм	290	270	-	-
Степень растекания (Г), мм ²	7,41	6,29	-	-
Средняя плотность, кг/м ³	2370	2390	2368	2369
Прочность (1 сут.), МПа:				
- сжатие	61,5	39,8	-	-
- изгиб	8,25	6,63	-	-
Прочность (28 сут.), МПа:				
- сжатие	131	103	80,2	69,6
- изгиб	16,4	15,4	-	-
Модуль упругости (28 сут.), ГПа:				
- статический	40,9	38,8	-	-
- динамический	46,5	42,9	47,9	45,2
Логарифмический декремент (28 сут.)	0,0170	0,0165	0,0220	0,0256
Деформация усадки, мм/м	0,47	0,41	0,27	-0,075
K_c^* , Па·м ^{0,5}	0,98		0,95	1,21
α , $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	12,8	12,1	11,9	11,7
Отношение деформации ползучести к упругой деформации	1,8	1,34	-	-

Анализ данных таблиц 21 и 22 позволил установить, что состав № 1 подходит в лучшей степени для случаев, когда критериями оптимизации являются показатели прочности и жесткости бетонов. Он оптимален для ответственных конструкций – опорные элементы, станины металлорежущих станков. Его усадку возможно уменьшить путём более продолжительного ухода, тогда как получение аналогичной прочности другими составами труднодостижимо.

Если лимитирующим фактором является минимизация усадки (важна для высокоточных изделий), а прочность 70 МПа достаточна, то можно рассмотреть состав № 4, который демонстрирует повышенную трещиностойкость. Термическое расширение экспериментальных составов находится на приблизительно эквивалентном уровне в диапазоне $11,7\text{--}12,9 \cdot 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Выводы по главе 3

1. Установлено, что вибропоглощающие свойства бетонов регулируются изменением минерально-фазового состава цементного камня за счет увеличения относительного содержания кристаллов этtringита. Повышение дозировки сульфоалюминатной расширяющей добавки с 5 до 15 % (от Ц) приводит к росту логарифмического декремента на 4,3–17,4 %, а введение 2 % бутилцеллозольва усиливает эффект на 4–5 %.

2. Установлен рост величины логарифмического декремента затухания бетона в 1,22 раза при увеличении удельного расхода ПЦ с 300 до 734 кг/м³, обусловленный общим снижением объёмной доли кристаллических фаз вследствие замещения части компонента (мраморной муки) цементным камнем, содержащим гелевые фазы (C-S-H). Снижение содержания пуццолановых добавок приводит к улучшению демпфирования бетона на 5–15 %, что связано с подавлением процесса роста фазы этtringита, при этом влияние микрокремнезёма меньше в сравнении с метакаолином.

3. Показано, что модификация поверхности крупного заполнителя силиконовым слоем позволяет эффективно абсорбировать энергию отклика первой моды при вибрационном воздействии. Анализ диаграмм свободных колебаний показал, что введение в состав рецептуры до 5 % заполнителя в виде стальных шариков с демпфирующим покрытием увеличивает коэффициент затухания бетона на 45–60 %.

4. Введение в бетон до 2 % волокон (по объёму) полимерной фибры приводит к незначительному снижению величины E_d 3–5 % при неизменной величине демпфирования, а стальной фибры – повышает E_d , снижая величину δ на 30 %. Увеличение содержания стальных волокон до 3 % сопровождается ростом прочности на сжатие со 136 до 153 МПа и на изгиб (от 18 до 35,4 МПа) и ростом модуля упругости на 20–23 %.

5. Установлена эффективность автоклавной обработки при температуре 130–140 °C с целью снижения усадки конструкционного бетона, в том числе модифицированного активной минеральной добавкой. Установлено снижение величины линейной усадки бетона в 1,27 раза у состава с добавкой и в 1,57 раза у состава, не содержащего микрокремнезём. Выявлен незначительный рост величины демпфирования при сохранении жёсткости и прочности материала после автоклавной обработки на протяжении приблизительно 120 минут. Наибольшая эффективность автоклавной обработки достигается при использовании в составе бетона активной минеральной добавки.

ГЛАВА 4. Оптимизация составов. Исследование структурообразующих процессов и свойств высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов

4.1 Исследование и оптимизация составов бетонных смесей по реотехнологическим свойствам

Исходя из иерархии критериев оптимизации (глава 1), удобоукладываемость смеси имеет максимальный приоритет, равный 9. В этой связи очевидна актуальность проблематики вопросов, касающихся поиска оптимальных сочетаний вида и количества вводимого пластификатора с микроразмерными компонентами структурной матрицы 1-го рода, обеспечивающих максимальное улучшение параметров растекаемости и устойчивости к расслоению. Эффективность такого взаимодействия исследовалась снятием кривых изменения величины поверхностного натяжения растворов ГП на границе «жидкость-газ». При этом исходили из предположения, что степень адсорбции на поверхности частиц микрометрической добавки напрямую влияет на изменение величины поверхностного натяжения (σ , Дж/м²). Очевидно также его влияние на процесс твердения и морфологию новообразований, формирующихся при гидратации микроцемента, и что особенно важно – на величину собственной усадки материала при твердении.

Определение характера влияния рецептурных факторов на поверхностное натяжение (σ , Дж/м²) производилось сталагмометрическим методом ($t_{\text{воздуха}}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Исследовалось изменение σ растворов гиперпластифицирующих добавок в зависимости от концентрации вводимых добавок (рисунок 75).

Из экспериментальных данных, отображенных на графиках, видно, что добавки Melflux 1641f, Melflux 2651f, Melflux 5581f демонстрируют схожие кривые изменения величины σ – практически линейное уменьшение при росте концентраций до 1–1,5 % с последующим выходом на плато со значением $\sigma=0,047\text{--}0,053$ Дж/м². Добавки Sika226-p, Sika240, PCE TR-6088 показывают меньшее снижение коэффициента поверхностного натяжения (до 0,063 и 0,065 Дж/м² соответственно) при оптимальной концентрации 0,5 %.

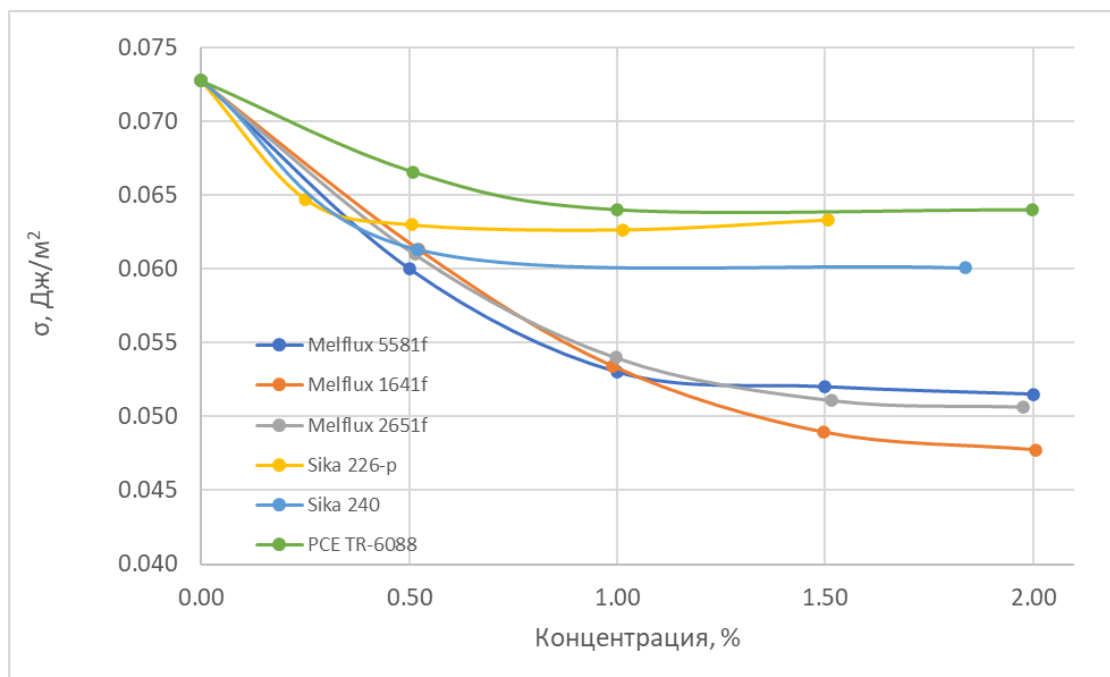


Рисунок 75 – Влияние концентрации ГП на поверхностное натяжение водных растворов

В последнее время интенсивно развивается технология внутреннего ухода за твердеющим бетоном, реализуемая при помощи специально вводимых в состав бетонной смеси добавок-аккумуляторов влаги. Это актуально в случае монолитного бетонирования тонких конструкций с высокой поверхностью влагоотдачи, в том числе напечатанных аддитивным способом. С учетом этого проводимые исследования дополнены изучением вопроса о влиянии суперабсорбирующих полимеров (САП) на водные растворы ГП. Исследовался аспект специфической адсорбции (абсорбции) молекул ПАВ, входящих в состав ГП, на поверхности (или в объеме) САП.

Исследование проводили на модельном водном растворе ГП+САП. В этом качестве взят 1%-й водный раствор ГП Melflux 5581F с добавлением к нему гранул полиакрилата натрия, предварительно насыщенных водой. Соотношение между ГП и САП составило 1:1, что соответствует средним дозировкам указанных компонентов в реальных составах бетона (по данным [122]).

Изучалось изменение величины σ дистиллированной воды и раствора ГП после добавления водонасыщенного САП (рисунок 76). Для этого экспериментальные составы помещали в химический стакан, перемешивали стеклянной палочкой в течение пяти минут и выдерживали 20 минут, после чего производилось фильтрование через фильтр красная лента.

Как показали предварительные опыты, фильтрование необходимо для предотвращения закупорки гранулами САП капилляра стеклянного сталагмометра. Для оценки

влияния фильтрования на σ раствора сравнялось значение σ 1%-го раствора ГП и фильтрата этого раствора.

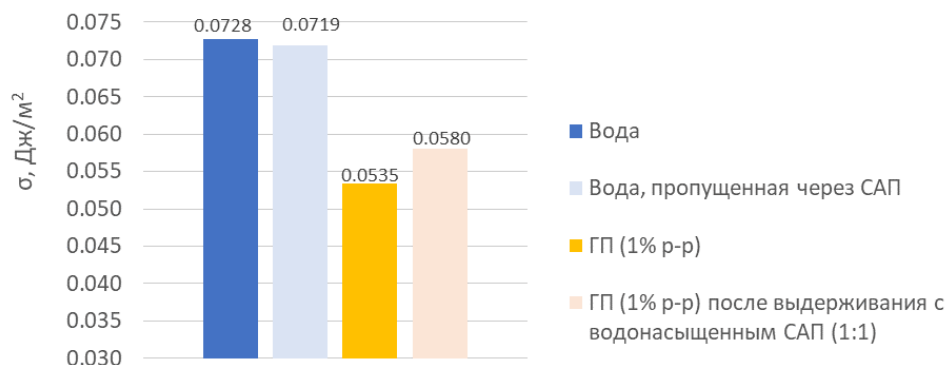


Рисунок 76 – Совместное влияние добавок САП и ГП на коэффициент поверхностного натяжения водного раствора

Из данных диаграммы видно, что введение САП не оказывает влияния на σ воды при данной температуре. Было предположено, что наблюдаемое повышение величины σ раствора ГП при добавлении САП обусловлено не явлением сорбции ГП гранулами полиакрилата натрия, а снижением концентрации ГП вследствие замещения части раствора водой, ранее абсорбционно связанной (т.е. разбавления исходного раствора чистой водой).

Для проверки поставили эксперимент, в котором сухие гранулы САП непосредственно добавляли к 0,5 и 1%-м растворам ГП. Количество САП было подобрано для абсорбции 2/3 объёма раствора. Результаты на рисунке 77 показывают, что в обоих растворах при добавлении САП не происходит изменение σ , а, следовательно, и концентрации ГП. Можно сделать вывод об отсутствии избирательной адсорбции гиперпластификатора, т.е. раствор добавки абсорбируется гранулами САП без разделения.

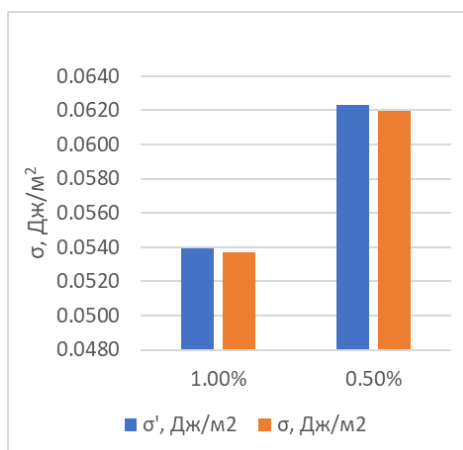


Рисунок 77 – Изменение коэффициентов поверхностного натяжения (σ) растворов ГП при добавлении сухого САП (σ') (при 20 °C)

В ходе последующих экспериментов исследовался вопрос адсорбции молекул гиперпластификатора на поверхности частиц минеральных добавок, отличающихся пуццолановой активностью. Выбирали из группы активных добавок, применяемых в составах ВФБ: МК-85, ВМК-45, трепел, маршалит, микрокальцит.

Перед опытами у заранее подготовленных добавок определяли удельную поверхность и влажность. В исследовании использовали растворы Melflux 5581f с концентрацией 1 и 0,5 %. Соотношение между гиперпластификатором и минеральной добавкой устанавливали по результатам предварительных расчётов составов ВФСБ.

Эксперимент заключался в следующем. Сначала навески добавок и аликвот раствора ГП помещали в химический стакан. Затем производилось их перемешивание в течение пяти минут, после выдерживания в течение 40 минут содержимое стаканов пропускали через фильтр синяя лента. Первые порции фильтрата удаляли для устранения влияния адсорбционной способности фильтра. Результаты определения величины поверхностного натяжения фильтрата представлены на рисунке 78.

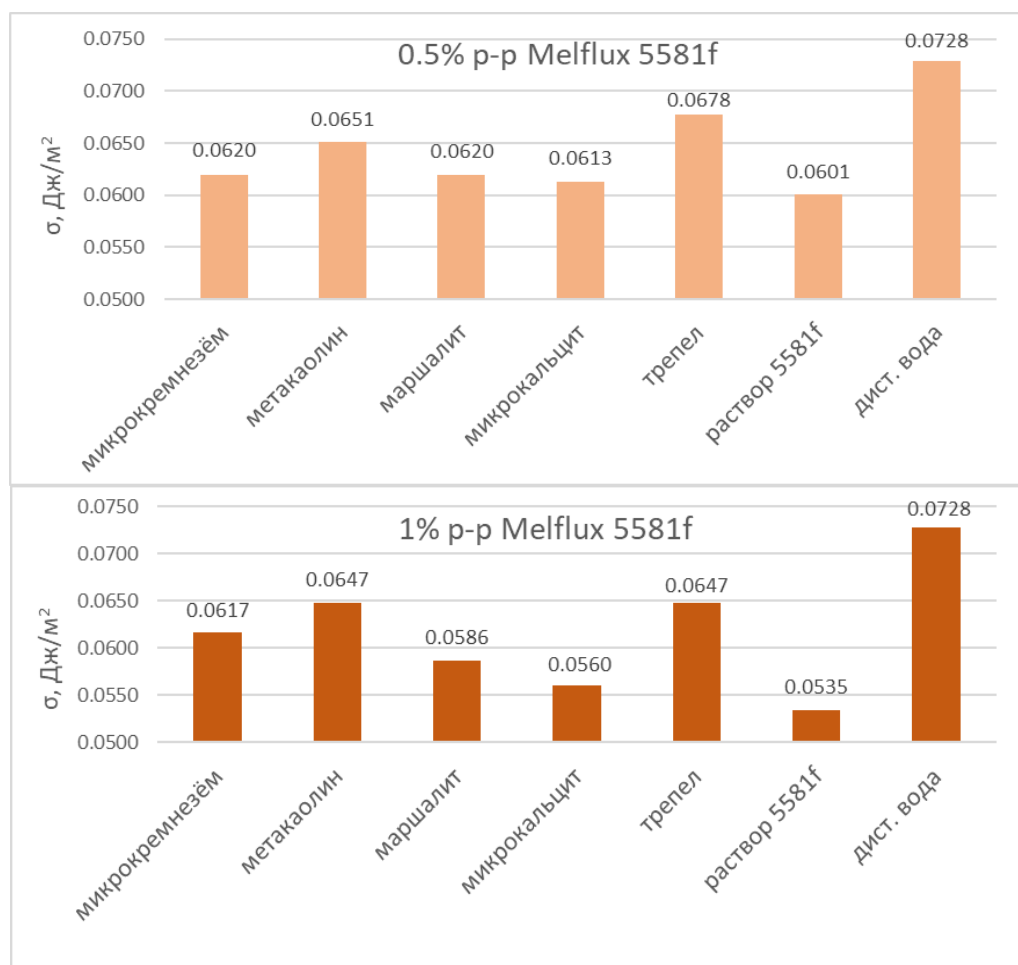


Рисунок 78 – Влияние вида активной минеральной добавки на величину σ водного раствора ГП с различной концентрацией

Результаты исследования адсорбционной способности показывают, что максимальный поглощающий эффект проявляется при введении порошков метакаолина и трепела. Таким образом можно заключить, что наблюдаемое увеличение адсорбции молекул ГП на минеральной поверхности наполнителя определяется не столько его минеральным составом (основность породы), сколько величиной удельной поверхности частиц (степень измельчения).

4.2 Выбор пластификаторов и микродобавок по их влиянию на кинетику гидратации

Влияние пластификаторов и микродобавок на кинетику гидратации цементных матриц 1-го и 2-го уровня, характерных для составов ВФСУБ, исследовали методом полуадиабатической калориметрии. Важность применения калориметрического подхода в проводимых исследованиях диктуется опасностью саморазогрева твердеющего ВФСУБ, из-за повышенного расхода цемента (таблицы 21 и 22). Это может негативно отразиться на термических деформациях и, в конечном итоге, целостности массивных конструкций. Поэтому всемерный контроль тепловыделения твердеющего ВФСУБ является актуальной задачей, без решения которой трудно расширить потенциал их применения на практике.

В настоящее время калориметрию применяют при оценке влияния рецептурно-технологических факторов на процессы гидратации цементных растворов, она также присутствует в составе нормативных документов для бетонов массивных сооружений (ГОСТ 24316-2022).

Описание конструкции и принципа работы полуавтоматического лабораторного комплекса со сменными оболочками, разработанного и применённого в исследованиях этого раздела диссертационной работы, приведено во второй главе.

На первом этапе определяли влияние пластифицирующей (ГП Sika 226-p) и суперабсорбирующей добавок на кинетику тепловыделения однокомпонентных цементных смесей (матрица 1-го уровня). Графики зависимостей, полученных при содержании вводимых добавок 0,5 % ГП и 0,1 % САП (от Ц), показаны на рисунке 79.

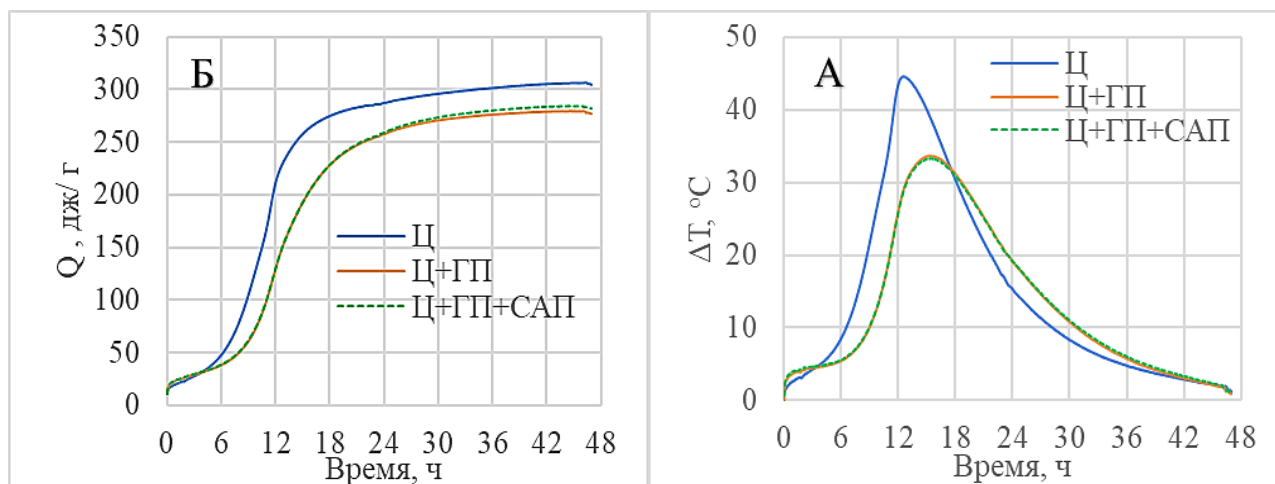


Рисунок 79 – Графики тепловыделения (матрица 1-го уровня):

А – термометрические кривые экспериментальных составов;

Б – кинетика тепловыделения

Из графиков тепловыделения видно, что пластифицирующая добавка увеличивает продолжительность индукционного периода ($\approx 21\%$) и снижает максимальную температуру гидратации ($\approx 24\%$). Добавка САП в дозировке $0,1\%$ от Ц не оказывает дополнительного влияния на кинетику тепловыделения составов, что подтверждает сделанный ранее вывод (раздел 4.1) об отсутствии специфической адсорбции молекул ГП на частицах САП.

Результаты исследования влияния минеральных добавок при их дозировке 15% от Ц на процесс тепловыделения твердеющих матриц 1-го уровня показаны на рисунке 80 и 81.

Из результатов проведенных экспериментов следует, что минеральные добавки оказывают различное влияние на кинетику тепловыделения (рисунок 80) и на предельные значения показателей калориметрии (рисунок 81). Наиболее длительный индукционный период наблюдается у состава с маршалитом, минимальная продолжительность – у составов с опокой и микрокремнеземом. Максимальное значение температуры зафиксировано у составов с микрокремнеземом и метакаолином. Одним из факторов влияния вида минеральной добавки может являться различная адсорбция пластификатора на частицах минерального порошка, интенсивность которой, как показано ранее, зависит от природы минеральной добавки.

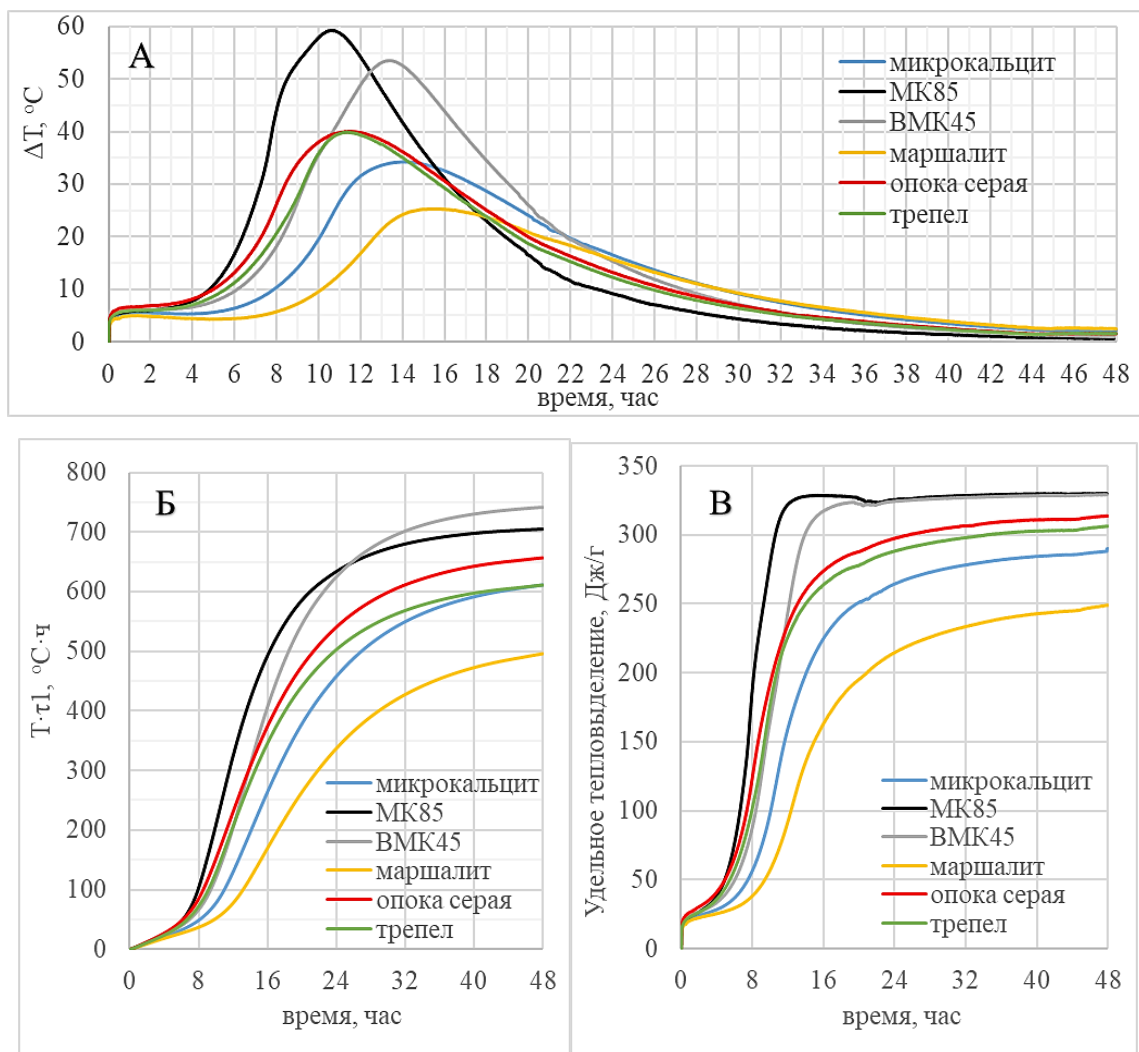


Рисунок 80 – Тепловыделение цементных матриц 1-го уровня ($V/C=0,5$):
 А – дифференциальная термограмма; Б – температурно-временная характеристика;
 В – удельное тепловыделение

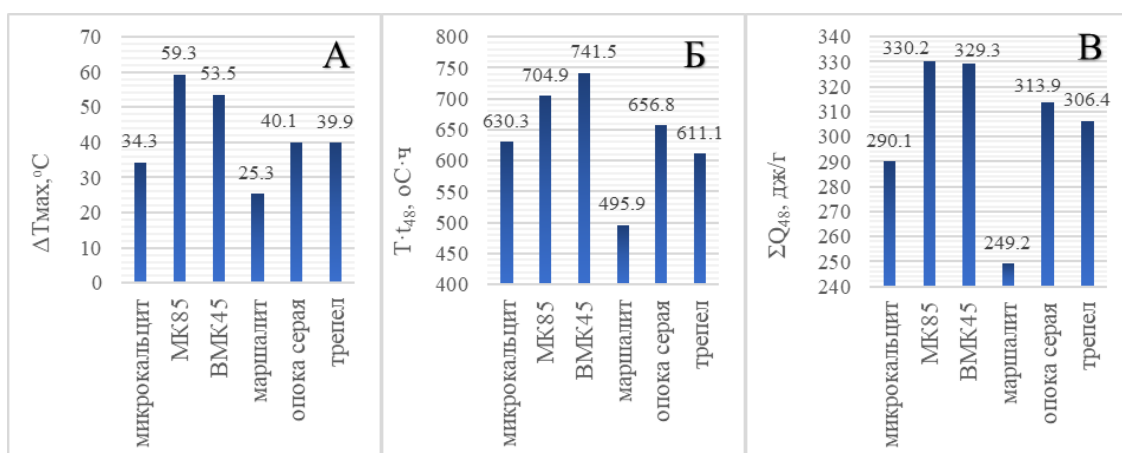


Рисунок 81 – Показатели калориметрии цементных матриц 1-го уровня:
 А – предельная температура; Б – температурно-временная характеристика;
 В – общее удельное тепловыделение

Для исключения влияния пластифицирующей добавки был поставлен дополнительный эксперимент. Исследовали непластифицированные цементные суспензии, содержащие минеральную добавку в количестве 15 % ($B/C=0,5$). Результаты калориметрии цементных суспензий с минеральной добавкой приведены на рисунках 82 и 83.

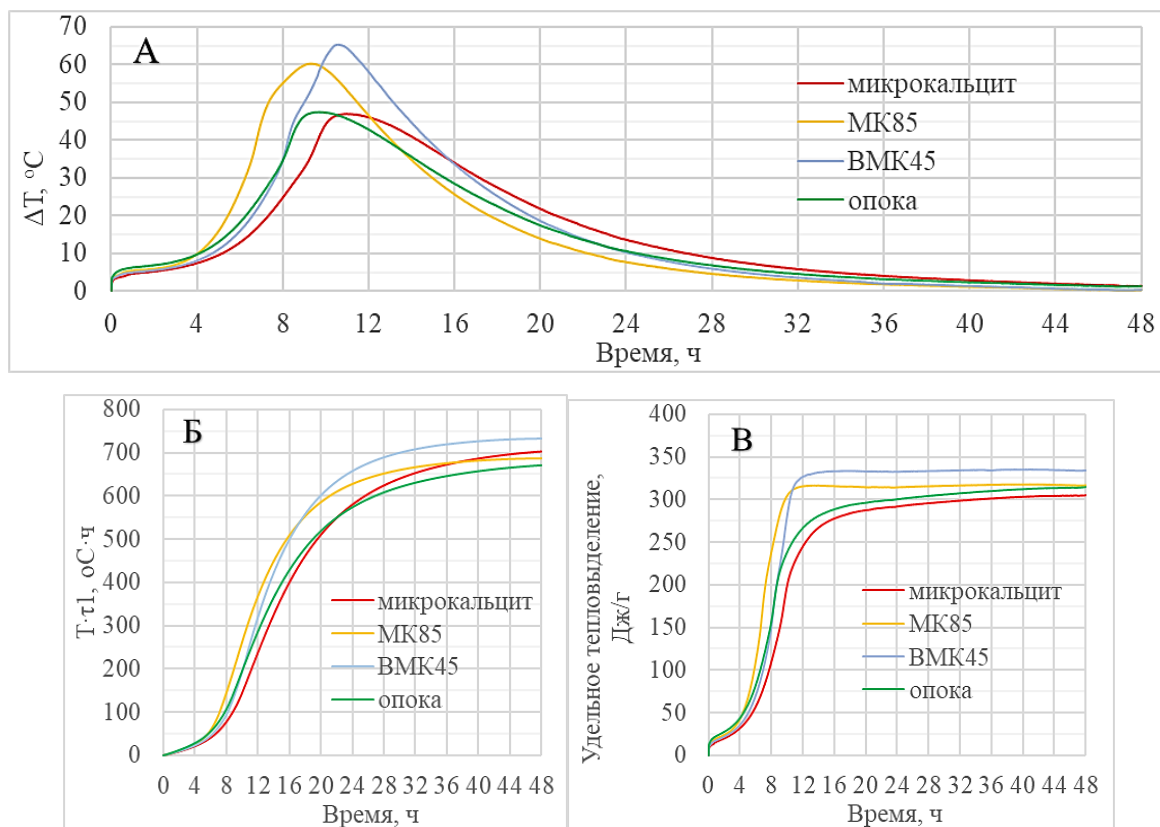


Рисунок 82 – Тепловыделение цементных суспензий с минеральной добавкой:
 А – дифференциальная термограмма; Б – температурно-временная характеристика;
 В – удельное тепловыделение

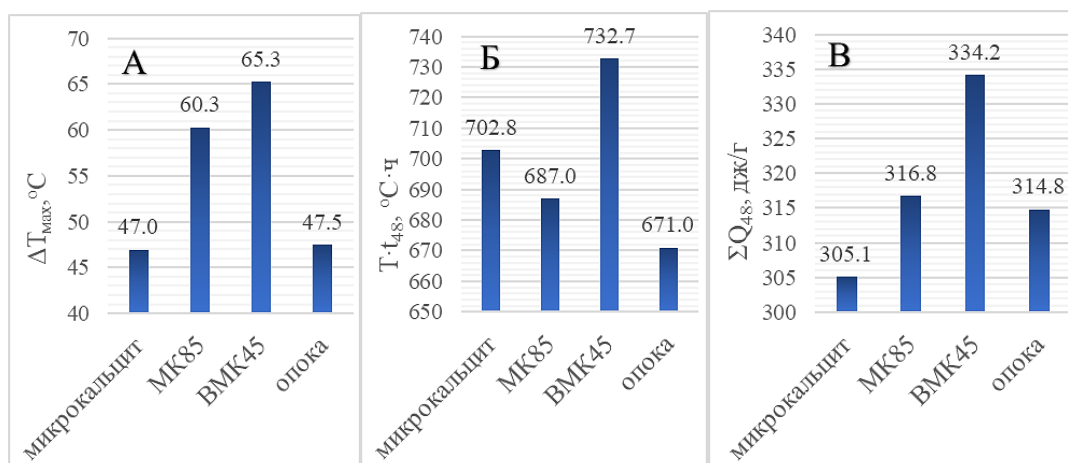


Рисунок 83 – Результаты калориметрии цементных суспензий с минеральной добавкой:
 А – предельная температура; Б – температурно-временная характеристика;
 В – общее удельное тепловыделение

Как видно из данных на диаграммах рисунков 82 и 83 при исключении воздействия пластификатора наблюдается уменьшение различий в величинах тепловыделения между экспериментальными составами. Вероятно, оставшиеся различия связаны с изменением истинного водоцементного отношения.

Далее исследовано влияние температурного фактора на кинетику тепловыделения цементно-водной суспензии ($B/C=0,5$). Температуру внутри калориметрической ячейки изменяли косвенным способом: изменением толщины теплоизоляционных слоев. Результаты экспериментов представлены на рисунках 84 и 85.

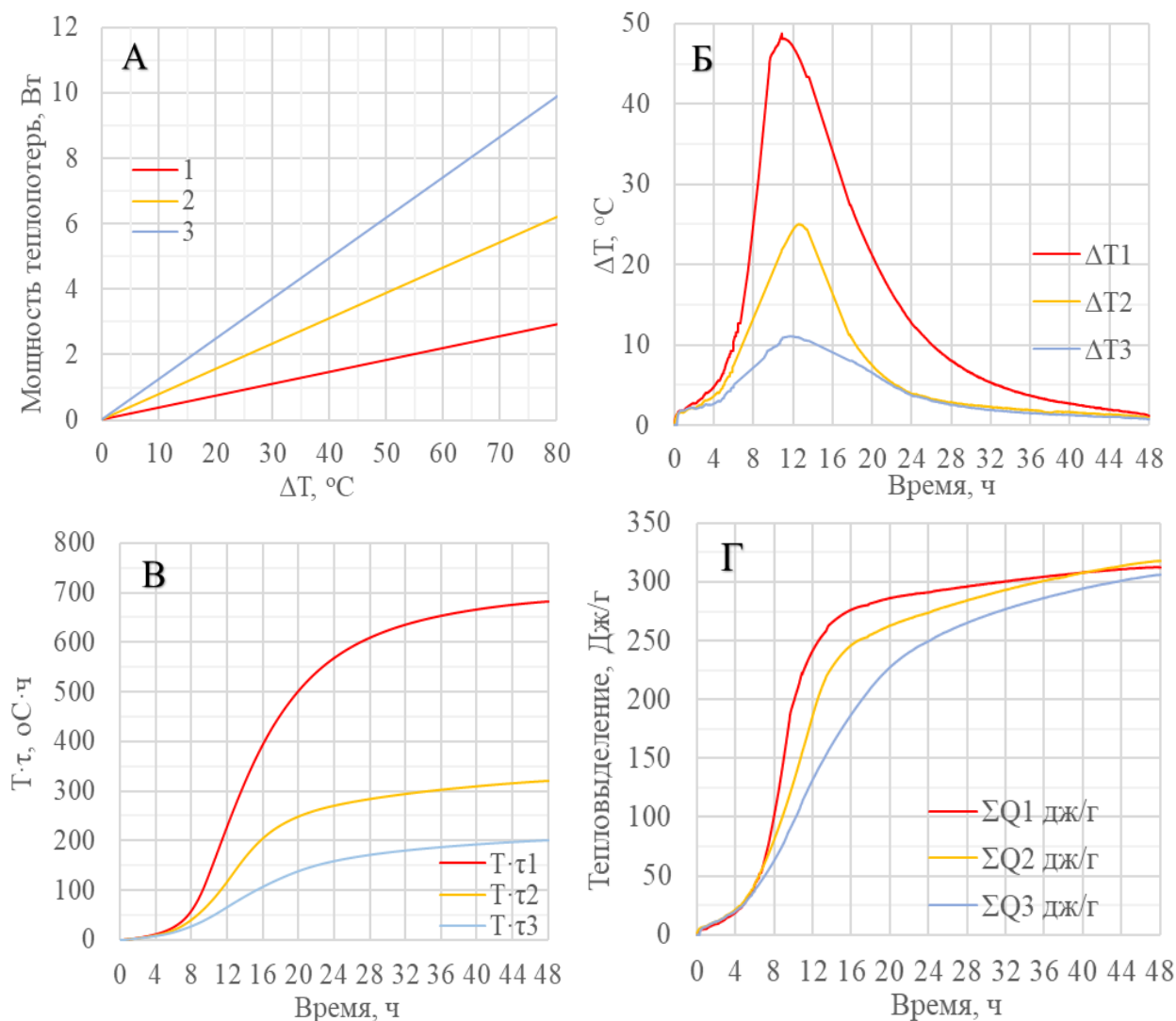


Рисунок 84 – Результаты калориметрии цементной суспензии при различной теплоизоляции: А – зависимость теплопотерь калориметрических ячеек от градиента температур для различных видов теплоизоляции; Б – дифференциальная термограмма; В – температурно-временная характеристика; Г – тепловыделение

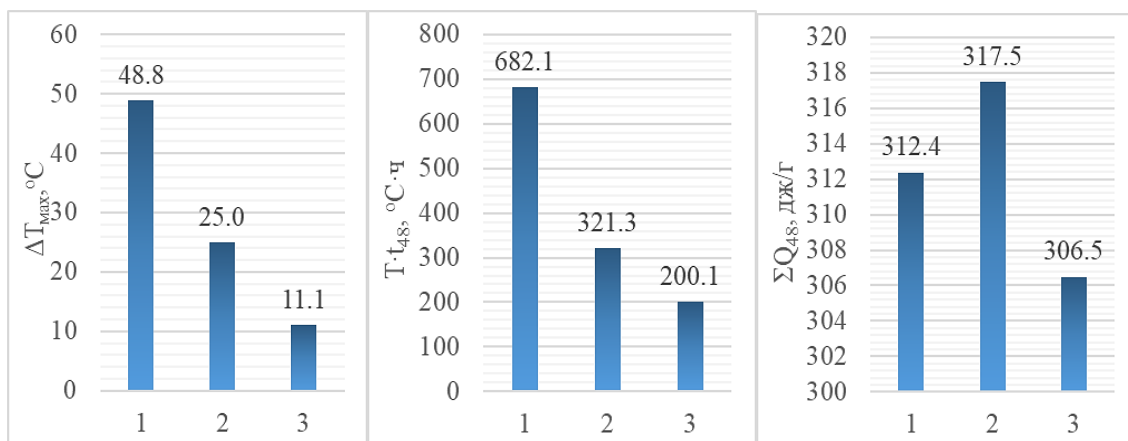


Рисунок 85 – Результаты калориметрии цементной суспензии при различной теплоизоляции: А – предельная температура; Б – температурно-временная характеристика; В – общее удельное тепловыделение

В экспериментах толщину слоев ограждающего контура подбирали опытным путем, обеспечивая двух- и трёхкратное увеличение мощности теплопотерь относительно базовой изоляции (рисунок 84 (А), линия 1).

Полученные данные указывают на значительную зависимость предельной температуры и температурно-временной характеристики от эффективности используемой теплоизоляции. Кинетика тепловыделения демонстрирует меньшую зависимость, особенно на вторые сутки твердения, что согласуется с результатами изотермической калориметрии при различных температурах [123]. Продолжительность индукционного периода практически не зависит от теплоизоляции, что очевидно связано с малой разностью температур в течение указанного периода.

4.3 Выбор добавок-компенсаторов усадки

Была исследована взаимосвязь величины поверхностного натяжения раствора затворения и усадочных деформаций. Ранее было предположено, что изменение величины σ за счет введения в состав химических добавок (например, ГП), может сформировать основу механизма снижения влажностной составляющей усадки бетона. Связь влажностной усадки бетона с величиной поверхностного натяжения в растворах затворения показана в ряде отечественных и зарубежных исследований [124–127].

Эффект заключается в уменьшении перепада величины капиллярного давления в микро- и нанометрических порах цементного камня при испарении влаги из бетона [85].

Известная зависимость между величинами капиллярного давления (P_k) и поверхностного натяжения имеет вид

$$P_k = - \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{r_k}, \quad (41)$$

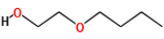
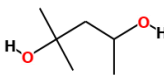
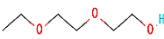
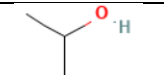
где σ – поверхностное натяжение на границе «жидкость-газ»;

θ – угол смачивания;

r_k – радиус капилляра.

Таким образом, регулирование величины поверхностного натяжения путем изменения величины капиллярного давления влияет на общую усадку цементного материала. Предварительные эксперименты показали, что наиболее подходящими для этой цели являются спирты и моноалкиловые эфиры этиленгликоля – целлозольвы. Примеры подобных соединений представлены в таблице 23.

Таблица 23 – Примеры соединений потенциально применимых с целью снижения величины поверхностного натяжения растворов

Систематическое наименование	Брутто-формула	Структурная формула	Молярная масса, г/моль	Плотность, г/см ³	Поверхностное натяжение, $\cdot 10^{-3}$ Дж/м ² (при 25 °С)	Растворимость в воде, г/100г
2-бутоксиэтанол	C ₆ H ₁₄ O ₂		118,17	0,90	26,14	не ограничена
2-метил-2,4-пентандиол	C ₆ H ₁₄ O ₂		118,17	0,92	32,59	не ограничена
2-этоксиэтанол	C ₄ H ₁₀ O ₂		90,12	0,93	28,20	не ограничена
2-(2-этоксиэтокси)этан-1-ол	C ₆ H ₁₄ O ₃		134,17	0,99	31,8	~48
Пропан-2-ол	C ₃ H ₈ O		60,1	0,78	20,9	не ограничена

Линейная усадка определялась по контрольным образцам-призмам 40×40×160 мм с закладными реперами из нержавеющей стали. Образцы извлекали из форм на следующие сутки после формования, затем калибровали реперы и снимали базовое расстояние

между ними. Образцы выдерживали в течение семи суток при нормальных температурно-влажностных условиях, а затем помещали в воздушно-сухие условия ($\varphi=60\text{--}70\%$; $t=20\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Размеры образцов определяли с помощью усовершенствованного измерительного стенда, снабжённого цифровым датчиком перемещения с ценой деления $0,001\text{ мм}$ (глава 2). Прочность – по контрольным образцам-кубам с ребром 30 мм .

На начальном этапе экспериментальным путём устанавливали вид зависимости величины σ растворов химических добавок (на границе «жидкость-газ») от их массовой доли. Концентрацию растворов постепенно увеличивали до выхода значений поверхностного натяжения на плато или до заранее известного предела рационального содержания исследуемой добавки в бетонной смеси. Изотермы поверхностного натяжения исследуемых растворов представлены на рисунке 86.

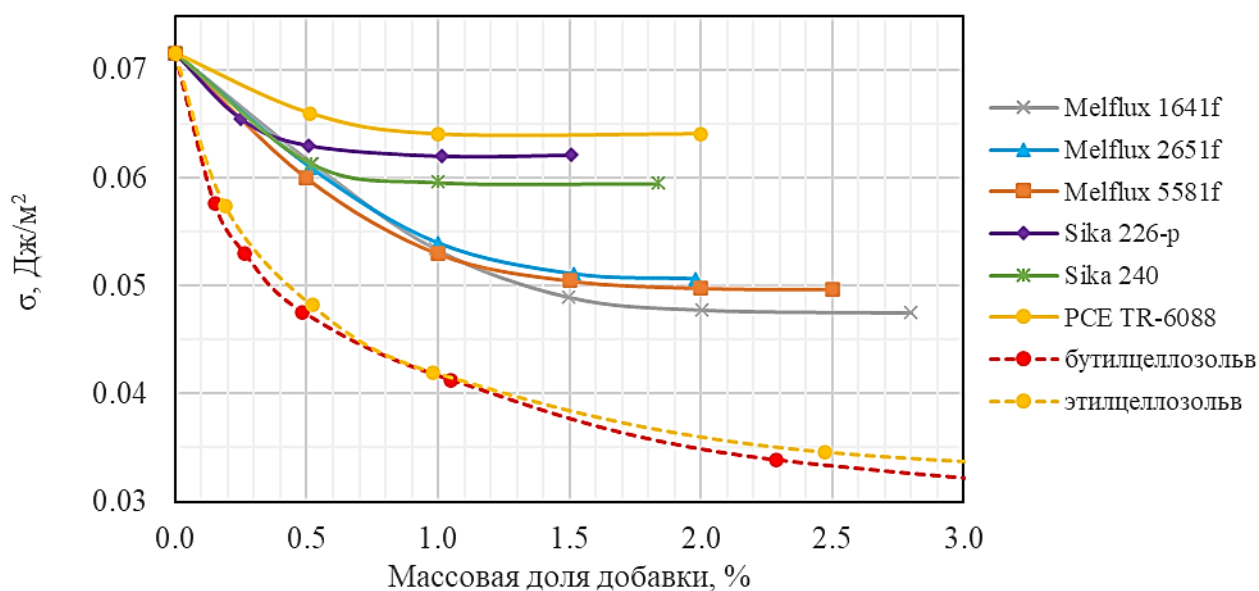


Рисунок 86 – Изотермы поверхностного натяжения водных растворов химических добавок

Согласно полученным данным предельное снижение величины поверхностного натяжения раствора наблюдается при концентрации пластифицирующих добавок $1\text{--}1,5\%$. В растворах целлозольвов выход на плато по значению σ наблюдается при концентрации $15\text{--}20\%$, что существенно выше их рациональных концентраций в растворах, применяемых для затворения бетонной смеси. Однако уже при их массовом содержании 2% редуцирующий эффект в отношении σ достигает величины $53\text{--}55\%$, а аналогичный эффект от введения ГП не превышает $11\text{--}34\%$ (рисунок 87).

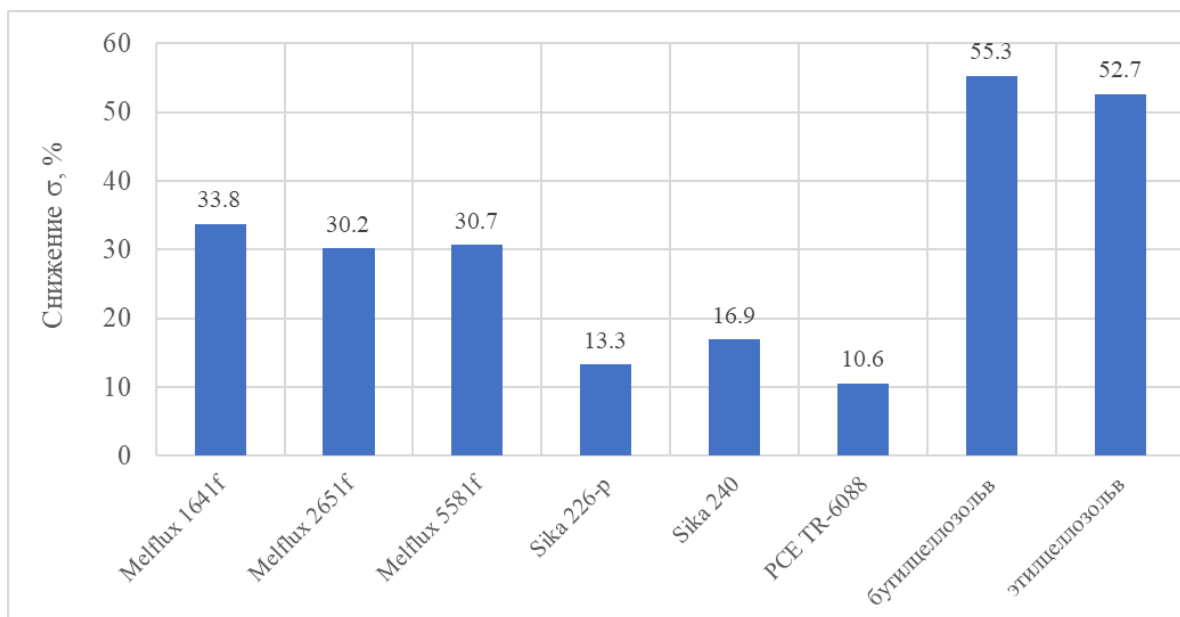


Рисунок 87 – Относительное снижение поверхностного натяжения в растворах добавок

Оценку влияния количества вводимой пластифицирующей добавки на усадку цементной матрицы 1-го уровня проводили на модельных составах, содержащих портландцемент и пластифицирующую добавку Sika ViscoCrete 226-p, дозировка которой составляла 0,1 и 0,3 % Ц (В/Ц=0,33), а массовая доля пластификатора в воде затворения – 0,3 и 0,9 % соответственно (рисунок 88).

Результаты показывают, что увеличение дозировки пластификатора без изменения водоцементного отношения не оказывает заметного влияния на кинетику усадки цементного камня: через 470 суток хранения разница в величинах деформации усадки не превышает 5 %, при потере массы 2 %. Кроме того, вследствие адсорбции макромолекул пластификатора и затрачивании части воды затворения при гидратации цементных фаз, сделать выводы об истинной концентрации пластификатора в воде, содержащейся в капиллярных порах весьма затруднительно.

Для усиления целевого эффекта снижения усадочных деформаций были приготовлены составы ВФСУБ с повышенным расходом вяжущего вещества. В качестве противоусадочных добавок применялись целлозольвы (составы 2 и 3), вводимые с водой затворения при их содержании 1 % Ц. Альтернативный вариант заключался в использовании компенсатора усадки Denka CSA 20 с дозировкой 7 % Ц (состав 4), вводимого с замещением части молотого песка, обладающего сравнимой водопотребностью. Контрольным выступал состав, не содержащий указанных добавок (состав 1). Сведения об экспериментальных составах представлены в таблице 24.

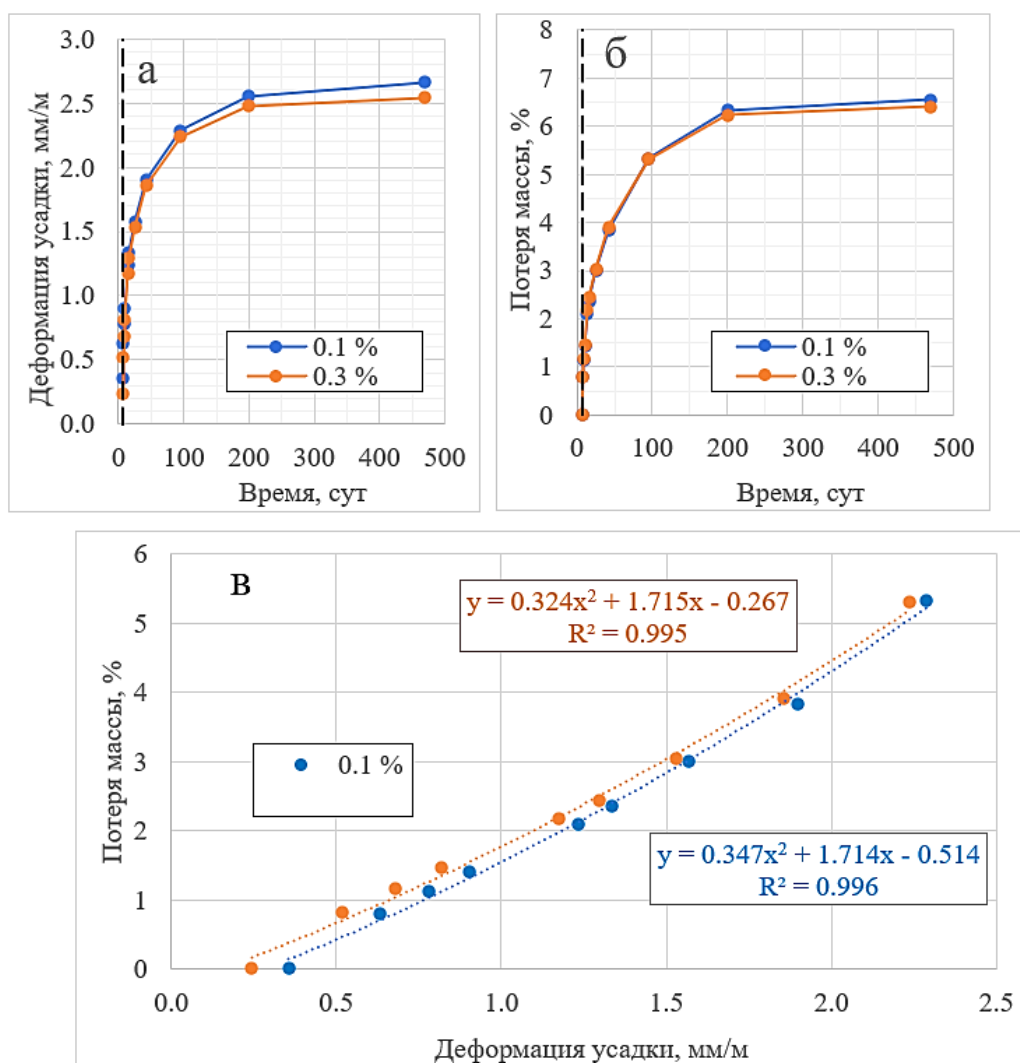


Рисунок 88 – Кинетика усадки (а), потеря массы (б) и зависимость (в) деформации усадки от потери массы цементной матрицы 1-го уровня с различным содержанием ГП Sika ViscoCrete 226-p (В/Ц = 0,33)

Таблица 24 – Составы ВФСУБ с повышенным расходом цемента

Компонент	Расход, кг/м ³ бетона			
	№ серии			
	1	2	3	4
Портландцемент	957	948	948	958
Микрокремнезём	76,6	75,8	75,8	76,6
Молотый песок	383	379	379	316
Песок кварцевый (М _к = 1.4)	526	521	521	527
Sika 226-p	7,7	7,6	7,6	7,7
Бутилцеллозольв	0,0	9,5	0,0	0,0
Этилцеллозольв	0,0	0,0	9,5	0,0
Denka CSA 20	0,0	0,0	0,0	67,1

В/Ц	0,316			
В/Т	0,156			
Плотность смеси, кг/м ³	2250	2240	2240	2260
Диаметр расплыва (конус Хагерманна), мм	330	360	355	332

Выявлен дополнительный пластифицирующий эффект целлозольвов: состав № 2 – диаметр расплыва увеличился на 9 %, состав № 3 – на 7,6 % относительно контрольного. Влияние добавок на относительную линейную деформацию усадки мелкозернистого бетона и ее связь с потерей массы продемонстрированы на графиках рисунка 89.

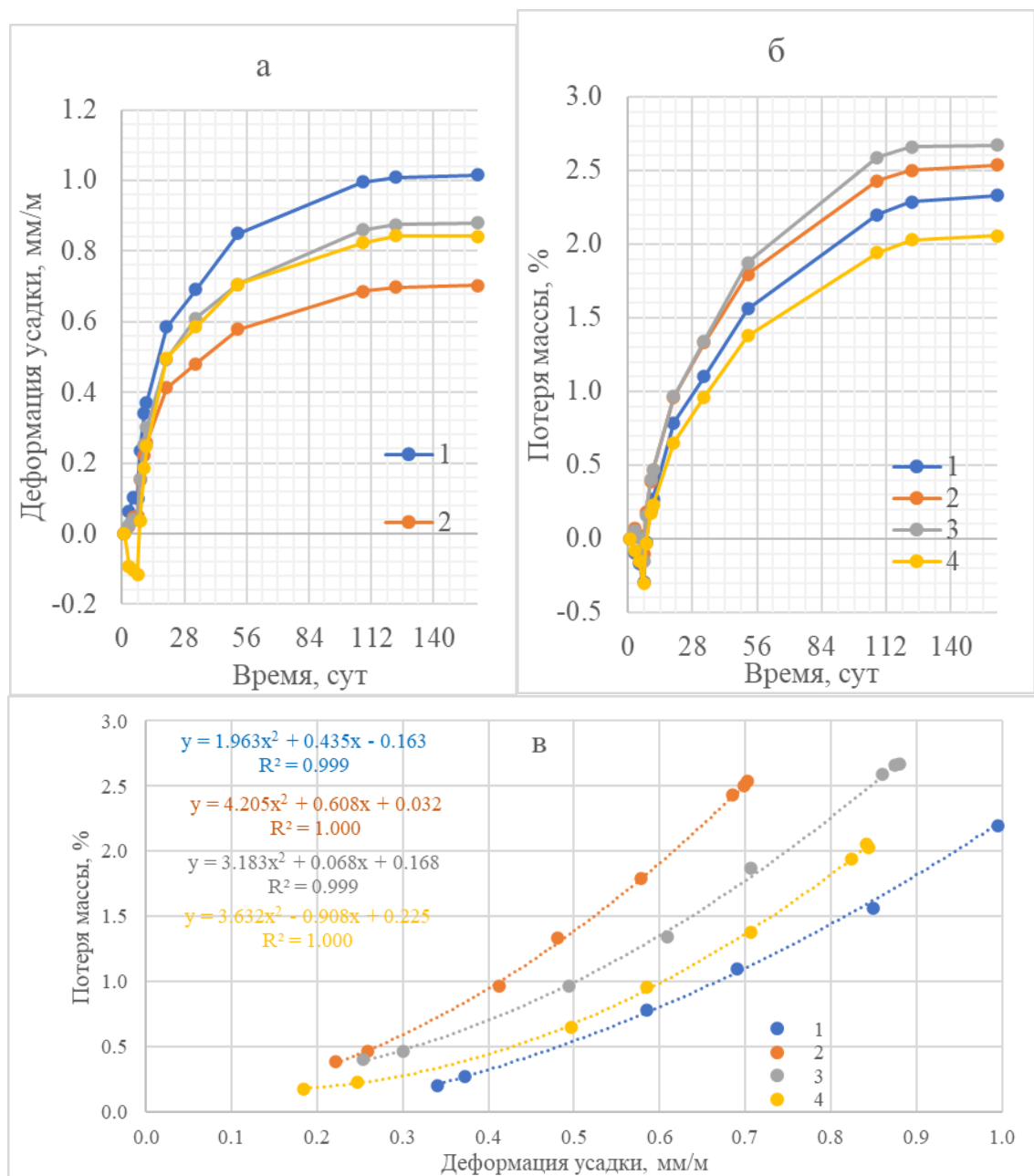


Рисунок 89 – Усадка образцов серий №1–№4: а – кинетика изменения потери массы; б – линейная усадка; в – зависимость деформации усадки от потери массы

По величине эффекта снижения усадки исследуемые добавки составляют ряд: бутилцеллозольв – 1,44 раза (max); Denka CSA 20 – 1,21 раза; этилцеллозольв – 1,15 раз (min).

Исследовалось влияние дозировок добавок бутилцеллозольва и Denka CSA 20 на усадку и прочность ВФСУБ (таблица 25). В качестве контрольных выступали составы, не содержащие добавок (рисунки 90 и 91).

Таблица 25 – Экспериментальные составы

Компонент	Расход, кг/м ³ бетона									
	№ серии									
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Портландцемент	652	651	648	643	635	627	652	652	652	652
Кварцевая мука	196	195	194	193	191	188	196	163	130	98
Песок кварцевый	М _к = 1,4						М _к = 2,33			
	1304	1302	1295	1287	1271	1255	1304	1304	1304	1305
Denka CSA 20	0	0	0	0	0	0	0	32,6	65,2	97,8
Бутилцеллозольв	0	1,3	6,5	12,9	25,4	37,6	0	0	0	0
Sika 226-p	5,21	5,21	5,18	5,15	5,08	5,02	5,21	5,22	5,22	5,22
Характеристики										
Denka CSA 20 (% _м от Ц)	-						0	5	10	15
Бутилцеллозольв (% _м от Ц)	0	0,2	1	2	4	6	-			
Содержание Sika 226-p в воде затворения, %	2,3									
Масс. доля бутилцеллозольва в воде затворения, %	0	0,6	2,8	5,5	10,4	14,8	-			
В/Ц	0,346									
В/Т	0,105									
Плотность смеси, кг/м ³	2380	2378	2371	2362	2345	2328	2382	2382	2383	2383

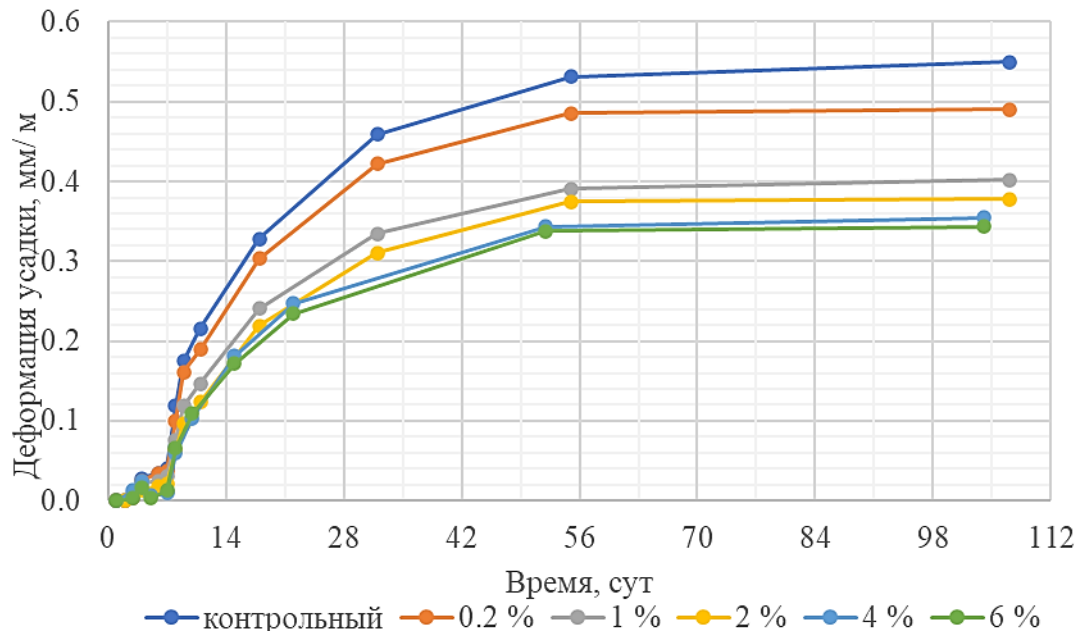


Рисунок 90 – Влияние бутилцеллозоля (% Ц) на усадку ВФСУБ

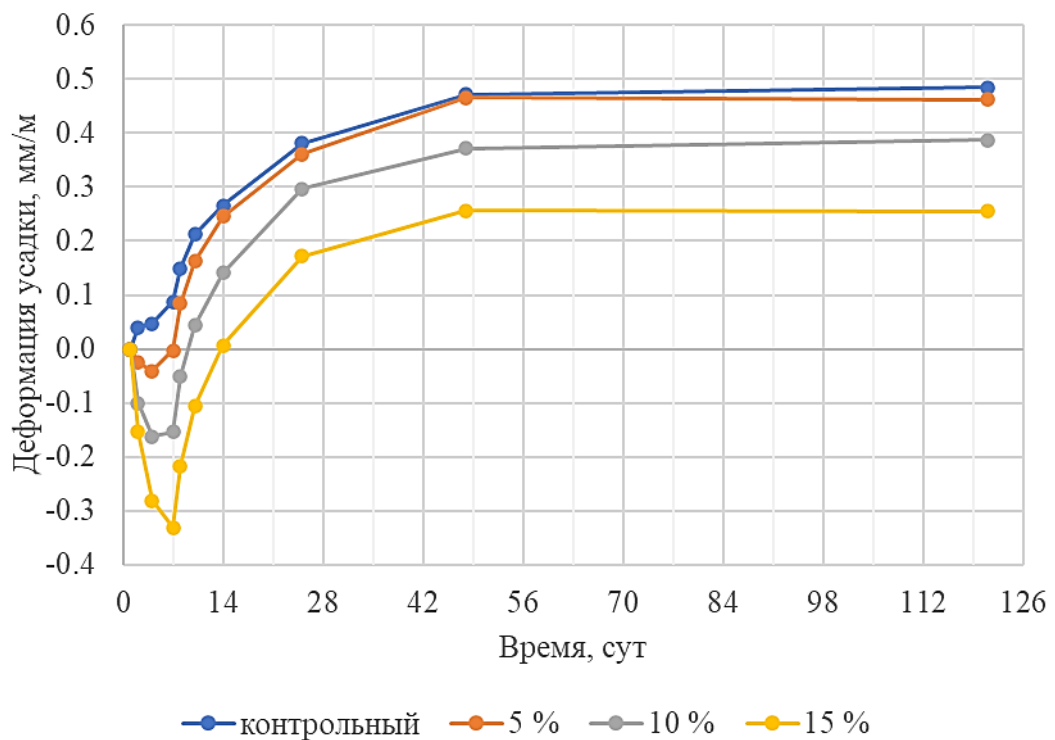


Рисунок 91 – Влияние Denka CSA 20 (% Ц) на усадку ВФСУБ

Для составов с бутилцеллозольвом максимальный эффект снижения усадки (1,62 раза) достигается при 6%-м содержании добавки, при этом шестикратное уменьшение дозировки обеспечивает достаточное сохранение эффекта (1,38 раза). Составы с Denka CSA20 также показывают снижение усадки с ростом количества введенной добавки: при 15%-м содержании эффект достигает 1,9 раза, а при 5%-м – практически исчезает.

Наряду с эффектом компенсации усадки важно, чтобы вводимые добавки не оказывали негативного влияния на механические показатели затвердевшего бетона. Результаты определения прочности образцов на различных сроках нормального твердения представлены на рисунке 92.

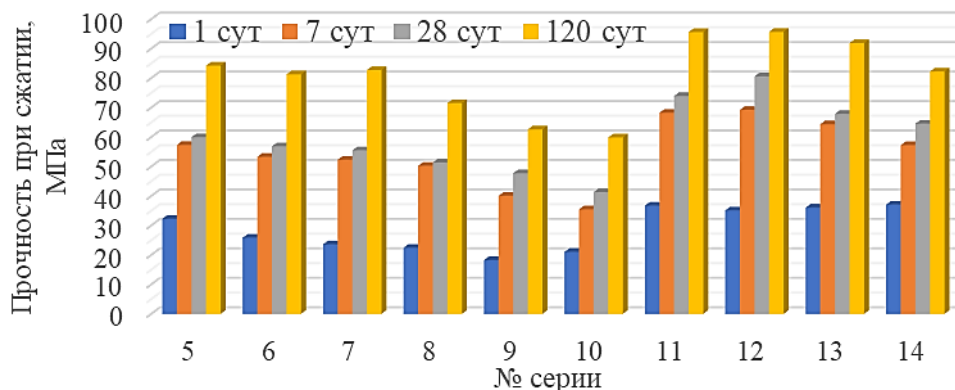


Рисунок 92 – Прочность ВФСУБ с различным содержанием добавок
(составы даны по таблице 25)

Согласно экспериментальным данным на поздних сроках твердения добавка бутилцеллозоля в дозировке до 1 % не оказывает заметного негативного действия на прочность мелкозернистого бетона. Оптимальная концентрация Denka CSA20 по показателю прочности ограничена 5–10 %.

Для оценки кинетики ранней усадки ВФБ использовалось устройство (см. главу 2 и рисунок 93, а).

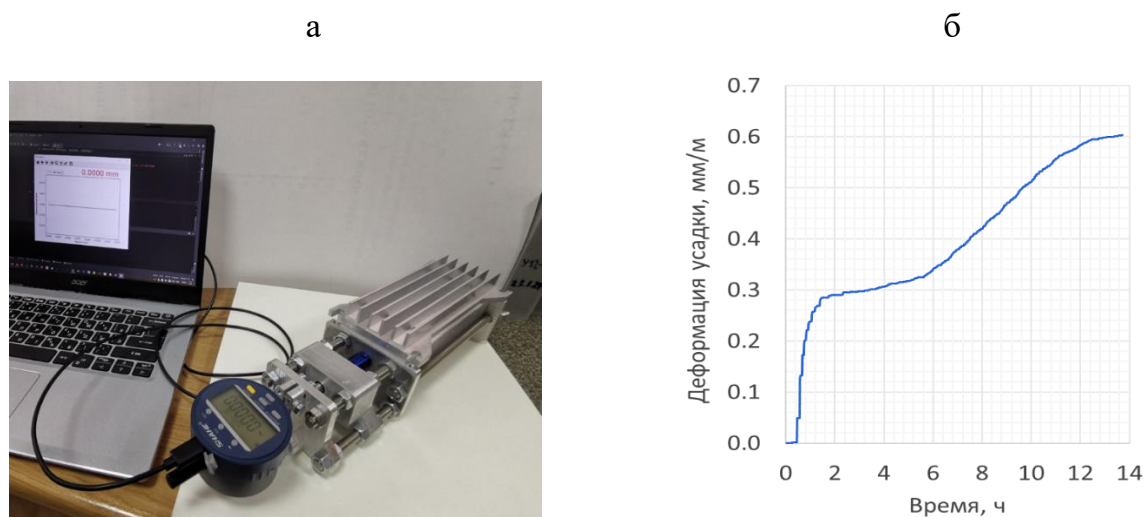


Рисунок 93 – Исследование ранней усадки бетона: а – процесс испытания;

б – диаграмма усадки за первые 14 часов нормального твердения

Из результатов видно, что процесс усадки является ступенчатым, причём продолжительность ступеней согласуется с данными полуадиабатической калориметрии, а

именно с продолжительностями прединдукционного и индукционного периодов. Полученные таким образом данные возможно использовать для определения общей усадки бетона.

4.4 Влияние модифицирующих добавок на минерально-фазовый состав и микроструктуру

Исследования проводили на модельных смесях «цемент-ГП-МК-противоусадочная добавка». Снижение усадки достигалось введением добавок двух типов: 1 – влияющих на влажностную составляющую путём понижения поверхностного натяжения в капиллярах цементного камня (бутилцеллозольв); 2 – расширяющих на основе сульфоалюмината кальция (САК).

Для сравнения эффективности противоусадочных добавок сульфоалюминатного типа использовали промышленные продукты от разных производителей, резко отличающихся по стоимости (Denka CSA20 – 120 руб/кг, CSA Expansive agent II – 25 руб/кг). Экспериментальные образцы получали в результате твердения в течение 28 суток цементно-водной матрицы с добавлением 10 % САК (при В/Ц=0,38 %) затем проводились рентгенофазовые исследования (рисунок 94).

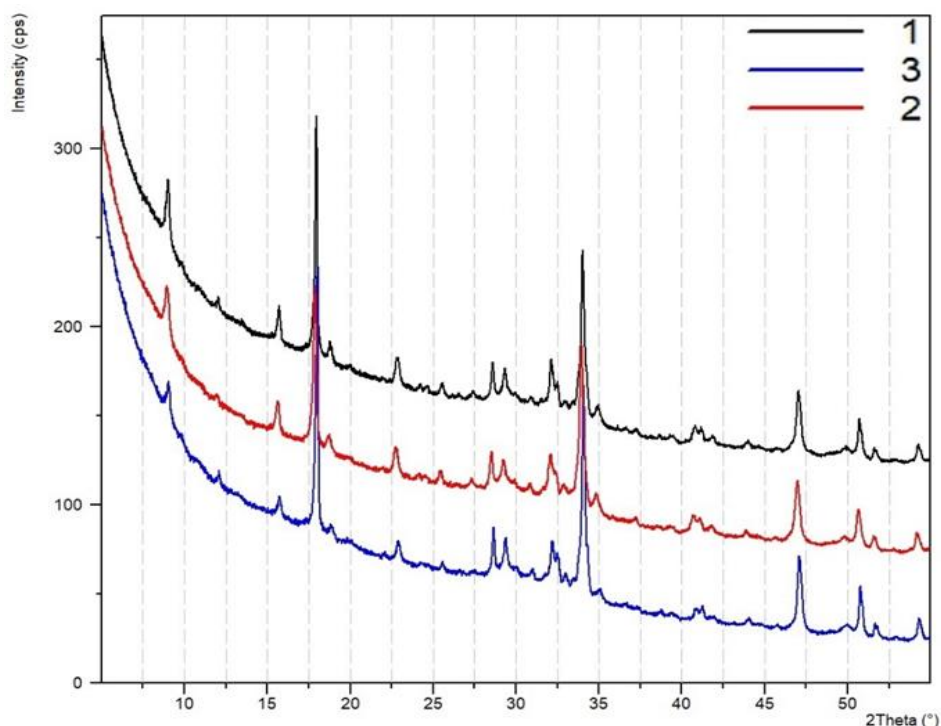


Рисунок 94 – Дифрактограммы образцов с добавкой САК:

1 – Denka CSA20; 2 – CSA Expansive Agent II; 3 – контрольный состав (без добавки САК)

Исследования проводили на дифрактометре Empyrean PANalytical PIXcel3D (Нидерланды). Определение фазового состава образцов – методом Ханавальта на основании открытой базы данных по кристаллографии. Результаты РФА (рисунок 94) показали, что по влиянию на синтез этtringита наиболее эффективной добавкой является Denka CSA20. На это указывает высокая интенсивность пиков, присутствующих на дифрактограмме (рисунок 94) и соответствующих межплоскостным расстояниям кристаллической решётки этtringита ($d=9,72; 5,61; 3,88; 2,56; 2,21; 3,48; 4,70; 4,98; 3,24; 2,15; 1,66; 2,18 \text{ \AA}$). Установлено, что рост интенсивности пиков, соответствующих межплоскостным расстояниям $9,72; 5,61; 3,88; 2,56 \text{ \AA}$ составляет 141, 125, 129, 175 % у составов с CSA Expansive agent II и 158, 137, 128, 150 % у составов с Denka CSA20 относительно бездобавочного состава. Отмечается также увеличение пиков ($d=10\text{--}14 \text{ \AA}$), характерных для низкоосновных гидросиликатов кальция (C-S-H), и обусловленных минералами тоберморита и ксонотлита.

Для пересчёта углов дифракции θ в межплоскостное расстояние d использовалось уравнение Брэгга $n\lambda = 2d \cdot \sin\theta$. Поскольку длина волны используемого в приборе рентгеновского излучения (λ) составляет $1,5418 \text{ \AA}$, то формула нахождения межплоскостного расстояния примет вид $d = 1,5418/(2\sin\theta)$.

4.5 Многокритериальная оптимизация составов. Показатели составов оптимизированных высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов

Исследовалось совместное влияние дозировок противоусадочных добавок бутилцеллольва и Denka на свойства бетонов. Определены дозировки компонентов, при которых возможно получение безусадочных составов в данных условиях твердения. С этой целью использовалось математическое планирование эксперимента.

Для исследования влияния совместного введения противоусадочных добавок на физико-механические и динамические свойства мелкозернистого бетона был спланирован двухфакторный эксперимент. Использовался композиционный ротатабельный план с квадратичной моделью. Тип модели – квадратичная регрессия. В качестве факторов задавались: содержание добавки Denka CSA20 в % по массе от Ц (фактор X_1); содержание бутилцеллольва в % по массе от Ц (фактор X_2). Основные уровни факторов X_1 и X_2 составляли 12 и 1,2 %, а интервалы варьирования 8 и 0,8 % соответственно. При пла-

нировании эксперимента задачей было обеспечить расположение зоны условной «безусадочности» вблизи от центра плана. Для оценки влияния дозировок модификаторов на усадку бетона при заданных температурно-влажностных условиях предварительно автором были проведены соответствующие эксперименты [70]. Сведения о планировании эксперимента сведены в таблицу 26.

Таблица 26 – План проведения эксперимента

Кодовая матрица		Фрагмент плана	Схема кодовой матрицы	Матрица планирования		
				№ соста- ва	добавка, % Ц	
X ₁	X ₂		X ₁		X ₂	
-1	-1	Ядро плана		1	0,4	4
1	-1			2	2	4
-1	1			3	0,4	20
1	1			4	2	20
-1,414	0	Опыты в «звёзд- ных» точ- ках		5	0,069	12
1,414	0			6	2,33	12
0	-1,414			7	1,2	0,686
0	1,414			8	1,2	23,3
0	0	Опыт в центре		9	1,2	12

Смешивание компонентов экспериментальных составов (таблица 27) осуществлялось ручным способом в лабораторной чаше затворения с предварительной гомогенизацией сухих компонентов. Формы помещались в камеру с нормальными температурно-влажностными условиями на срок 24 часа. После распалубки образцы выдерживались при нормальных условиях в течении семи суток, затем помещались в условия с температурой 18–23 °С и относительной влажностью 30–40 %.

Таблица 27 – Экспериментальные составы бетона

№ состава (Компонент, кг/м ³ бетона)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Портландцемент	615	609	615	609	617	608	612	612	612
Кварцевая мука	283	280	185	183	234	231	302	163	233
Песок кварцевый	1230	1218	1231	1218	1233	1215	1224	1225	1224
Бутилцеллозольв	2,46	12,2	2,46	12,2	0,42	14,2	7,34	7,35	7,35

Denka CSA20	24,6	24,4	123,1	121,8	74,0	72,9	4,2	142,8	73,5
Sika 226-p	4,92	4,87	4,92	4,87	4,93	4,86	4,89	4,90	4,90
Вода	215	213	215	213	216	213	214	214	214
Характеристики бетонной смеси									
В/Ц	0,35								
В/Т	0,10								
Плотность, кг/м ³	2375	2361	2377	2362	2379	2359	2368	2370	2369
Диаметр распы- ва, мм	101	107	94	98	91	105	106	99	104

Результаты экспериментов, проведенных по плану математического планирования, представлены на рисунке 95.

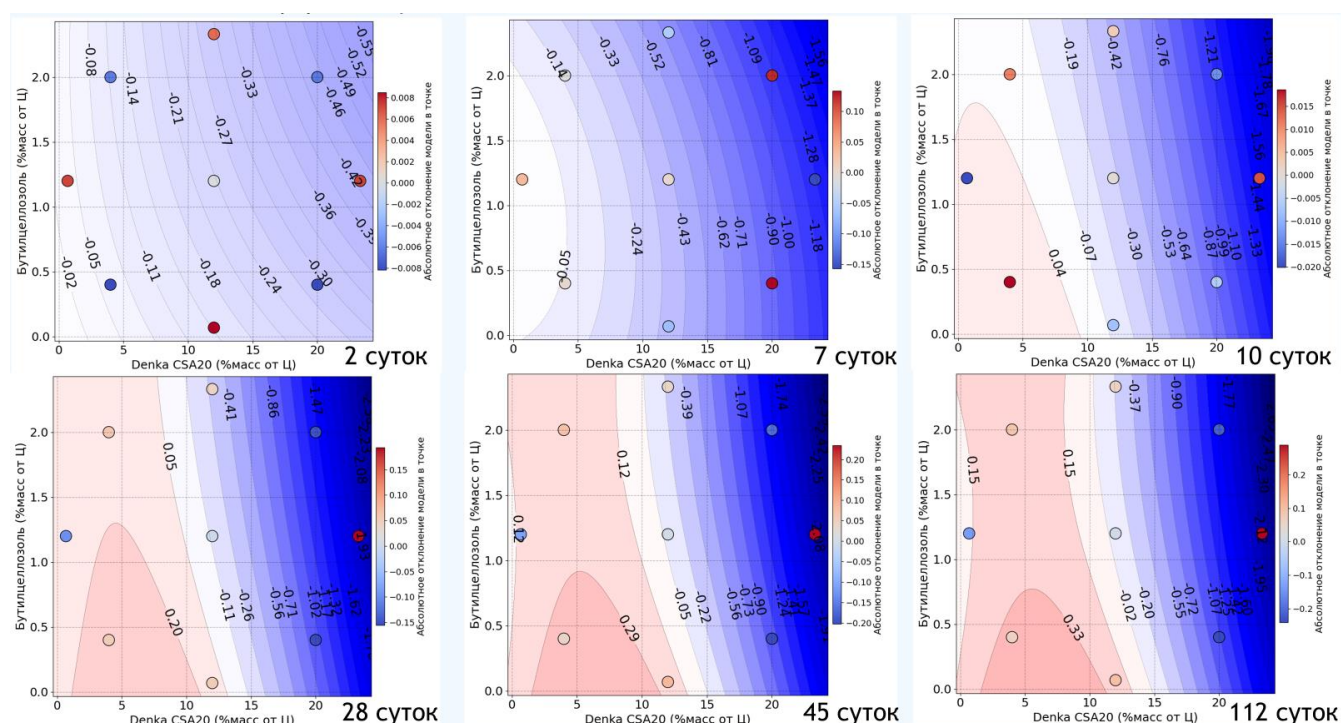


Рисунок 95 – Совместное влияние бутилцеллозольва и Denka на усадку ВФСУБ

Анализ данных показывает, что добавление бутилцеллозольва к дорогостоящей сульфоалюминатной расширяющейся добавке Denka CSA20 обеспечивает получение безусадочных составов при одновременном снижении расхода в 1,6 раза.

По результатам двухфакторного эксперимента установлено, что повышение дозировки добавки (Denka CSA20) с 5 до 15 % (от Ц) приводит к росту логарифмического декремента на 4,3–17,4 %, а введение до 2 % бутилцеллозольва усиливает эффект на 4–5 %.

Установлено повышение плотности и прочности бетонов при добавлении бутилцеллозоля, обладающего пластифицирующим действием. Максимальное значение E_d наблюдается у составов с содержанием 4–6 % расширяющей добавки и 1,5 % модификатора поверхностного натяжения. Повышение расхода Денка до 12 % сопровождается ростом величины демпфирования (рисунки 96 и 97), что свидетельствует о повышении степени гетерогенности цементного камня.

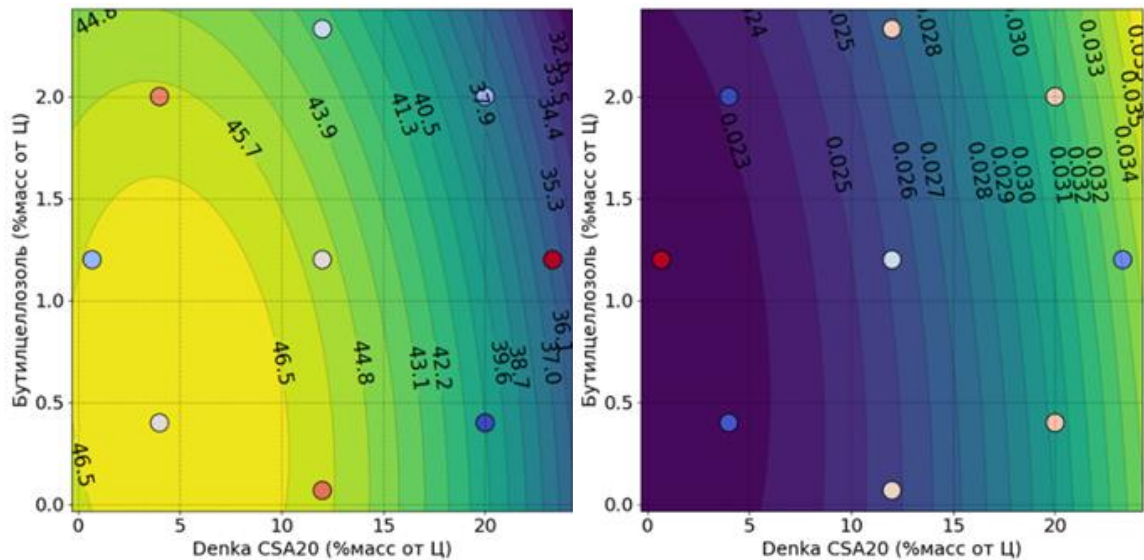


Рисунок 96 – Влияние добавок на вибродинамические свойства бетона:

а) динамический модуль упругости, ГПа; б) логарифмический декремент затухания

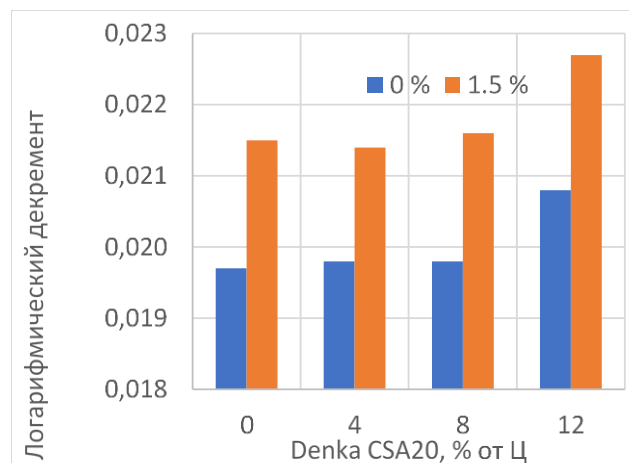


Рисунок 97 – Зависимость величины демпфирования от содержания расширяющейся добавки при различных содержаниях бутилцеллозоля

Анализ совокупности полученных данных показал правильность высказанного ранее (глава 3) предположения о том, что модификация составов ВФСУБ путем введения сульфосодержащих добавок обеспечивает улучшение вибродинамических показателей бетонов за счет процессов формирования минерально-фазового состава и морфологии продуктов гидратации эттингитовой фазы в цементном камне.

4.6 Оценка долговременной прочности и деформаций ползучести. Прогноз длительности эксплуатации в различных режимах

Исследование влияния циклического замораживания на динамические показатели бетона проводилось на контрольных образцах экспериментальных серий (таблица 27). После предварительного определения их изначальных характеристик E_d^0 и δ^0 образцы помещались в автوماتическую холодильную камеру. После извлечения из камеры образцы находились в воздушно-сухих условиях на протяжении семи суток, затем вновь определялись вибродинамические показатели (E_d^1 ; δ^1). На рисунке 98 представлены поверхности отклика функции отношения конечной величины соответствующей характеристики к её начальному уровню перед испытанием.

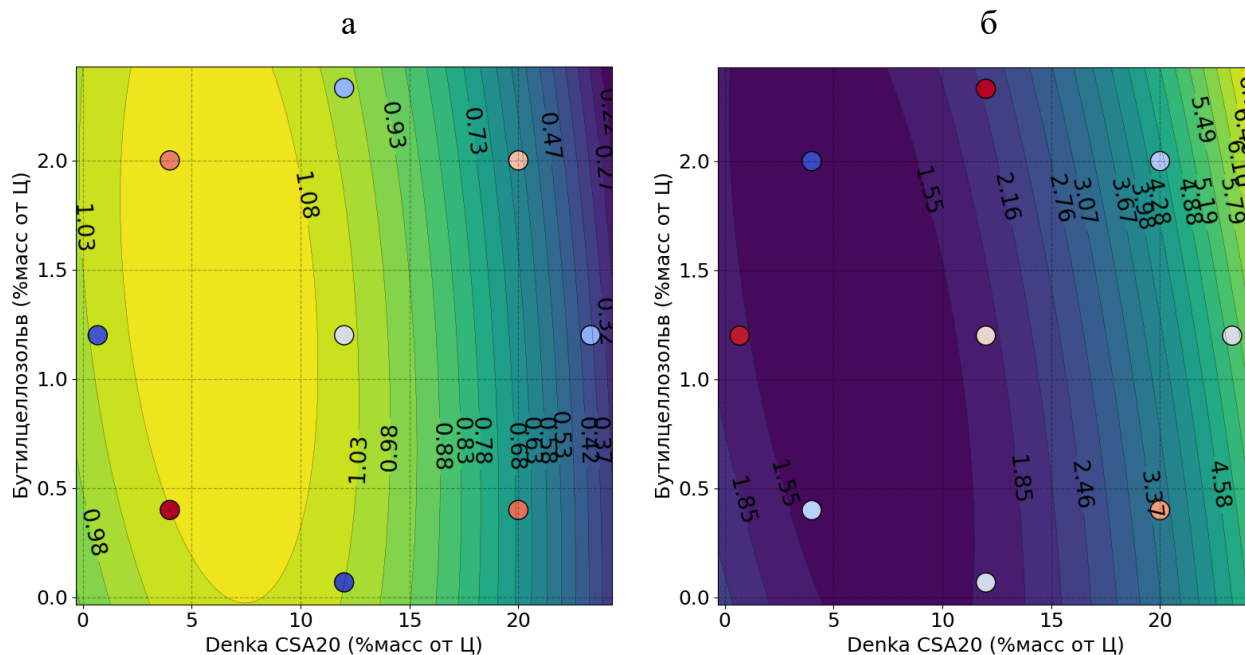


Рисунок 98 – Влияние состава бетона на изменение вибродинамических свойств после 30 циклов «замораживание-оттаивание»: а – отношение E_d^1/E_d^0 ; б – отношение δ^1/δ^0

Влияние циклического замораживания на динамические показатели бетона вероятнее всего вызвано не только повышением дефектности структуры бетона вследствие расклинивающего действия замерзающей воды, но и обусловлено фактом выдерживания образцов в воде, поскольку твердение образцов после распалубки происходило лишь в камере с н.у. твердения. Выдерживание образцов в воде способствовало увеличению количества новообразований в структуре цементного камня, что косвенно подтверждается увеличением плотности (на 2–4 %), набуханием образцов (отрицательные деформации

усадки до 2 мм/м у составов с высоким содержанием сульфоалюминатной добавки) и небольшим (5–9 %) повышением модуля упругости у образцов наиболее оптимального состава (составы № 2, 5, 7, 9). Вместе с тем у образцов с большим содержанием расширяющей добавки наблюдается значительное (до 60 %) снижение модуля упругости и многократное увеличение демпфирования, что объясняется появлением трещин в структуре материала.

Для оценки влияния противоусадочных добавок на прочность бетона исследовались образцы состава 1 (таблица 22). Сравнивалась кубиковая прочность образцов после 30 циклов замораживания и контрольных образцов, хранившихся на воздухе. В результате установлено снижение величины прочности на 8,4 %.

Ползучесть оценивалась при четырёхточечном изгибе на уровне нагружения 0,3 путём нахождения соотношения между деформацией ползучести в течение 90 суток и упругой деформацией при том же уровне нагружения. Данное соотношение для испытанных составов лежит в диапазоне 1,3–1,9.

Выводы по главе 4

1. Увеличение адсорбции молекул ГП на минеральной поверхности наполнителя определяется не столько его минеральным составом (основность породы), сколько величиной удельной поверхности частиц (степень измельчения). Максимальный поглощающий эффект характерен для наполнителей на основе метакаолина и трепела.

2. Введение в бетон до 2 % волокон (по объему) полимерной фибры приводит к незначительному снижению величины E_d (1,5–3,0 %) при неизменной величине демпфирования, а стальной фибры – повышает E_d , снижая величину демпфирования на 5–7 %. Увеличение содержания стальных волокон до 3 % сопровождается ростом прочности на сжатие со 136 до 153 МПа и на изгиб (от 18 до 35,4 МПа), а также ростом модуля упругости на 20–23 %.

3. Исследование влияния пластификаторов и микродобавок на гидратацию цементных матриц методом полуадиабатической калориметрии показало, что поликарбоксилатная добавка Sika ViscoCrete 226-P увеличивает продолжительность индукционного периода на 21 %, снижая максимальную температуру гидратации на 24 %.

4. Установлено повышение плотности и прочности ВФСУБ при добавлении бутилцеллозольва, обладающего пластифицирующим действием: предельное напряжение сдвига снижается в 1,12–1,14 раза при добавлении 1–1,5 % добавки.

5. На примере Denka CSA20 доказано, что добавление бутилцеллозольва к дорогостоящей сульфоалюминатной расширяющейся добавке обеспечивает получение безусадочных составов при одновременном снижении её расхода в 1,6 раза.

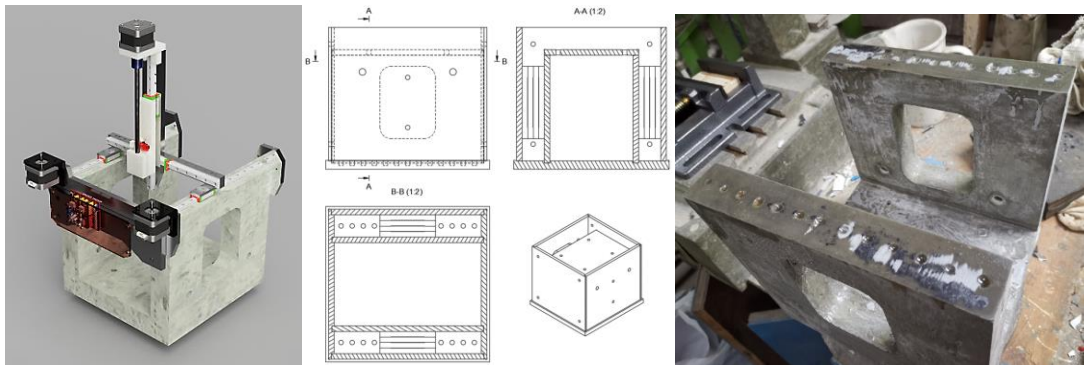
6. Максимальное значение E_d наблюдается у составов с содержанием расширяющейся добавки 4–6 % при отсутствии модификатора поверхностного натяжения (бутилцеллозольв). Повышение расхода Denka CSA20 до 12 % сопровождается снижением E_d и ростом величины демпфирования, что свидетельствует о повышении структурной неоднородности цементного камня.

ГЛАВА 5. Экспериментальная апробация и оценка технико-экономической эффективности применения высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов

5.1 Экспериментальная апробация

Апробация разработанных составов проведена в лаборатории ПГУАС при проектировании и формовке бетонных станин, а также несущих конструкций лабораторного и научно-исследовательского оборудования [19, 26, 67, 128]: измерительного комплекса для оценки реологии смесей методом вискозиметрии (рисунок 99, А); силовой машины по испытаниям рулонных материалов на разрыв, а также их адгезии к основаниям (рисунок 99, Б).

А)



Б)

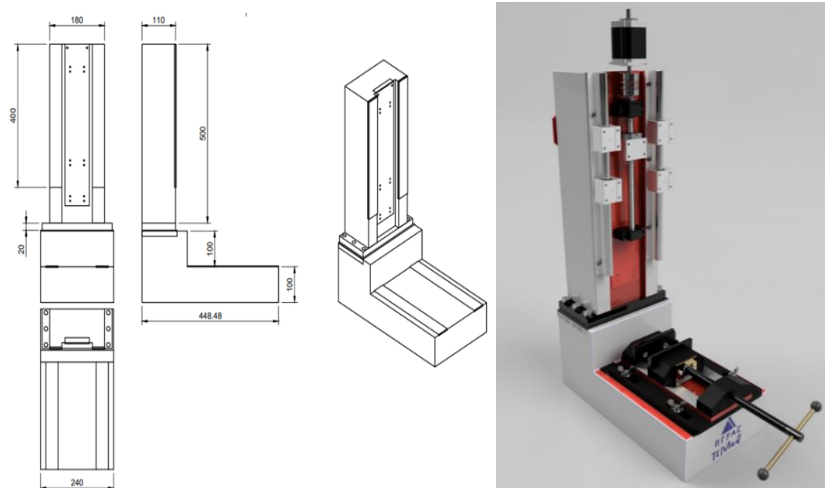


Рисунок 99 – Применение разработанного бетона в конструкциях учебного и научно-исследовательского оборудования:

А – комплекс для измерения реологических показателей; Б – разрывная машина

Литую бетонную смесь укладывали в сборную форму, изготовленную из влагостойкой фанеры. В форме закреплялись закладные элементы, на продольные стенки устанавливались пустотообразователи (рисунок 100).

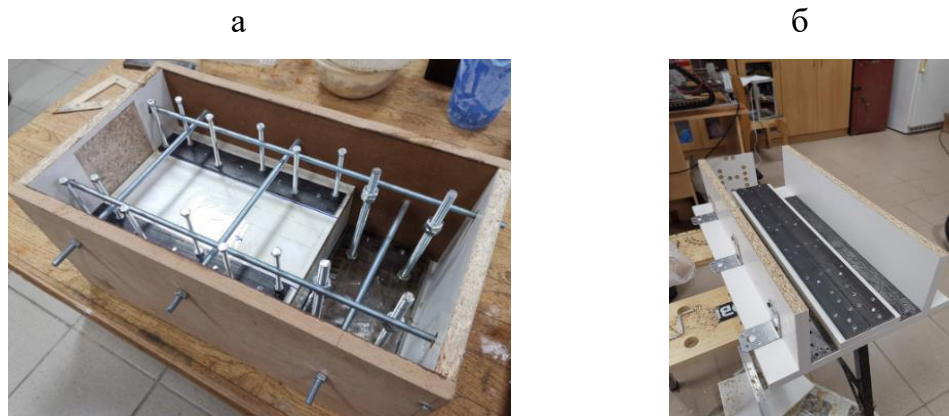


Рисунок 100 – Изготовление станины разрывной машины:

А – формование нижней части; Б – сборка формы верхней части

Характеристики станины разрывной машины: общая высота – 720 мм; ширина – 180 мм (верхняя часть), 240 мм (нижняя часть); толщина – 110 мм (верхняя часть), 100 мм (нижняя часть); объём – 24 л; металлоёмкость – 11 кг; общая масса – 68 кг; прочность бетона – 100 МПа.

На рисунке 99 А представлена отформованная из разработанного бетона станина размерами 265×250×240 мм с толщиной стенок 40 мм. Верхние привалочные поверхности перед монтажом рельсовых направляющих выравнивались шлифованием после 40 суток твердения при нормальных условиях и последующей пропитки полимером. При малой величине динамических нагрузок основное требование к станине – обеспечение размерной стабильности. Повторный контроль выравненных поверхностей производился также способом «на краску» через пять месяцев. Наблюдалась практически идентичная картина распределения пятен краски, что говорит об отсутствии видимых отклонений от базовой плоскости за указанный период времени.

При проектировании испытательных машин использовались данные численного моделирования с учётом совместной работы бетонного композита, арматуры и анкеров закладных деталей. Так при проектировании разрывной машины основным критерием оптимизации геометрических параметров и компоновки арматуры являлась деформация станины под действием предельной рабочей нагрузки и усадки (рисунок 101).

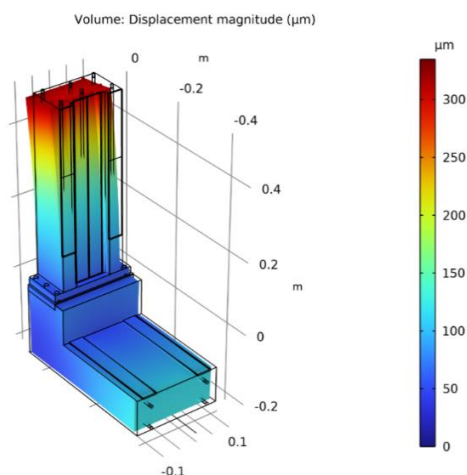


Рисунок 101 – Распределение напряжений и перемещений бетонной станины в составе разрывной машины (результаты получены в ПО COMSOL Multyphysics)

В связи с развитием современных технологий компьютерного мультифизического моделирования появляются широкие возможности по оптимизации геометрических параметров бетонных несущих элементов, в том числе с использованием методов «Generative design». Это требует исследования полного спектра свойств материала и точной информации о всех внешних статических и динамических нагрузках. В рамках диссертационной работы создан малогабаритный металлорежущий фрезерный ЧПУ-станок с железобетонными базовыми деталями из разработанных составов. Он использовался в качестве работающего опытного прототипа для исследований поведения материала в условиях реальных конструкциях, подвергающихся вибрационному воздействию. На этапе проектирования определяли тип конструкции станка, необходимые технические характеристики и комплектующие. В разработку была принята трёхосевая конструктивная схема с подвижным по оси «Y» столом и неподвижным порталом, на котором закреплены системы перемещения электрошпинделя по осям «X» и «Z». Размеры рабочего поля – 300×300×150 мм, скорость перемещения по осям «X», «Y» и «Z» – 6000, 6000 и 4000 мм/мин – соответственно (ускорение 800; 800; 500 мм/с²). Выбор привода осей производился исходя из заданных скоростных показателей и предварительной оценки массы перемещаемых элементов. В качестве элементов привода всех осей были выбраны шаговые двигатели Nema23CS30C и ходовые винты с шариковинтовой передачей SFU1605 нормального класса точности. Для системы перемещения выбраны профильные рельсы типоразмера HGR20 с каретками HGW20CC.

При разработке конструкции станины целью проектирования являлось достижение максимальной динамической жесткости в расчётном частотном диапазоне, а также кон-

тактной жесткости в местах соединения закладных деталей с бетоном. Этот процесс включал в себя оптимизацию формы и толщины элементов станины, конфигурацию закладных деталей, арматурных стержней и анкеров. При конструировании соблюдались следующие ограничения:

- исключение наличия резонансных частот в диапазоне от 0–150 Гц;
- максимальный единичный объём отливки бетона не должен был превышать 20 л из-за ограниченной производительности используемого бетоносмесителя;
- габаритные размеры станины и закладных деталей принимались на основе используемых комплектующих и требуемого рабочего поля станка. Конструирование осуществлялось в среде SolidWorks, для численного моделирования использовалось ПО COMSOL Multiphysics. Синхронизация результатов производилась с использованием модуля LiveLink. В результате был разработан проект сборной железобетонной станины (рисунок 102), состоящей из верхней части (портала) и нижней. Объём бетона верхней и нижней части равен 18,3 и 19,9 л, а масса 54,6 и 58,7 кг, соответственно.

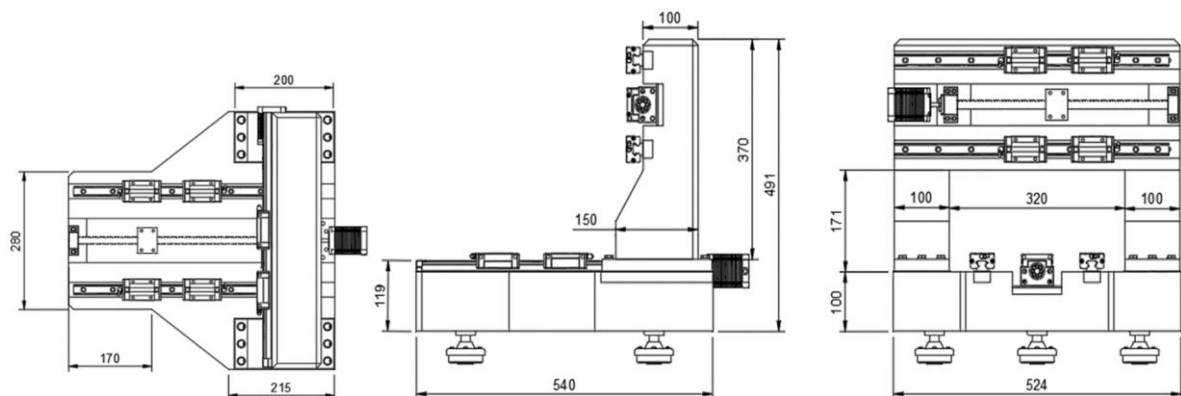


Рисунок 102 – Схемы бетонной станины

С целью снижения вычислительной нагрузки дополнительные детали, установленные на станине, и подвижные несущие элементы были исключены из расчетной модели, а их влияние было имитировано путем задания распределенной и дистанционно прикрепленной массы. Закрепление модели осуществлялось в местах расположения виброопор. При моделировании (рисунок 103) задавались физико-механические характеристики бетона, исследованные ранее [67, 129].

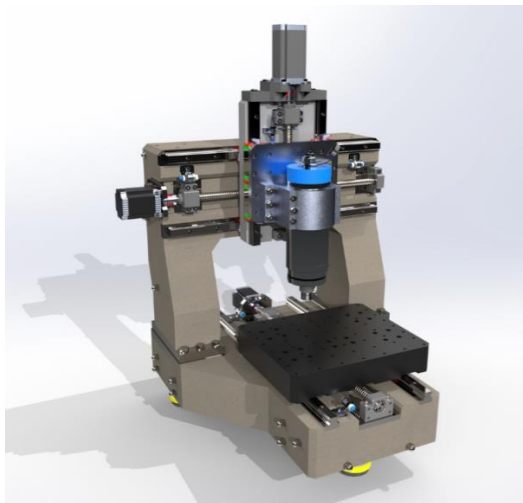


Рисунок 103 – 3D-модель станка с несущими элементами из разработанного бетона

В соответствии с проектом станка были изготовлены формы из ламинированной МДФ для отливки элементов станины. Торцевые поверхности деталей формы, отверстия и пазы под закладные детали перед сборкой парафинировались во избежание влажностных деформаций. Снижение шероховатости поверхности формуемых деталей достигалось покрытием стенок форм эмульсионной смазкой ОЭ-2. Для дополнительного повышения качества поверхности изделий в состав бетонной смеси вводился пеногаситель ПГ-5 в количестве 0,05 % от массы цемента. Как показали дополнительные эксперименты, введение указанного количества добавки не оказывает заметного влияния на физико-механические свойства бетона, но на 50–80 % снижает его открытую пористость. Использовалась самоуплотняющаяся бетонная смесь с диаметром расплыва из конуса Хегерманна 300–320 мм.

Процесс изготовления железобетонной станины заключался в следующем. Для снижения пыления и улучшения качества смеси порошкообразные компоненты – цемент, микрокремнезём, каменная мука – предварительно перемешивались в гомогенизаторе. Полученная смесь помещалась в бетоносмеситель роторного типа СБ-МИНИ 80, после чего добавлялись заполнители (рисунок 104, А) и производилось перемешивание до получения однородной смеси. Далее, при работающем смесителе добавляли воду затворения в количестве 70–80 % от указанного в рецептуре. После двух-трех минут перемешивания вводили оставшееся количество воды с растворенной пластифицирующей добавкой, перемешивание продолжалось до получения смеси заданной текучести. Приготовленная бетонная смесь выгружалась в транспортировочную ёмкость, из которой на месте проведения работ заливалась в форму (рисунок 104 Б, В). Для снижения интенсивности испарения воды из бетонной смеси формы накрывались воздушно-пузырчатой

полиэтиленовой пленкой. После первых суток твердения при температуре 25–27 °С изделия распалубливали и помещали на 28 суток в камеру с нормальными условиями твердения.



Рисунок 104 – Процесс изготовления станины:

А – загрузка компонентов в бетоносмеситель; Б – формование; В – распалубка

После извлечения из камеры части станины (рисунок 105) выдерживали на воздухе в течение трех месяцев, затем поверхности закладных деталей обрабатывали шлифованием, а открытые поверхности бетона пропитывали гидрофобизирующим составом, исследование которого приведено ниже.



Рисунок 105 – Железобетонная станина: А – верхняя часть; Б, В – нижняя часть

Монтаж элементов станка – направляющих, опор ходовых винтов, держателей шаговых двигателей, был выполнен с применением стальных юстировочных прокладок и шайб толщиной от 0,01 до 0,1 мм. Такое решение обосновано возможным воздействием остаточной усадки на геометрию станины.

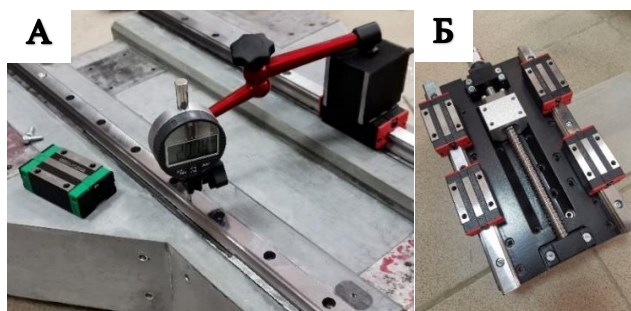


Рисунок 106 – Установка и контроль направляющих: А – ось «Y»; Б – ось «Z»

На рисунке 107 изображен станок в сборе.



Рисунок 107 – Общий вид фрезерного ЧПУ станка с бетонными несущими элементами

По прошествии 8–12 месяцев предполагается провести демонтаж и окончательную коррекцию геометрии закладных деталей, что после окончательной сборки позволит определить класс точности станка.

5.2 Защитная пропитка поверхности бетона в условиях эксплуатации.

Исследование гидрофобизирующих составов для поверхностной пропитки

При эксплуатации бетон в составе вибронагруженных конструкций подвергается воздействию влаги и водных растворов, что может вызывать ускоренную коррозию цементного камня. Для снижения опасности развития деструктивных процессов следует покрывать поверхность бетона пропитывающими гидрофобизирующими материалами. Исследовались различные виды покрытий: Sika antisol; Axton; Jobi; эпоксидная смола марки ЭД-20 в чистом виде и в смеси с 10 % ацетона по массе. Эффективность защитного покрытия оценивалась по показателю водопоглощения образцов бетона размером 30×30×30 мм, предварительно высушенных до постоянной массы и покрытых исследуемым гидрофобизатором, нанесение покрытия осуществлялось кистью в один или два слоя, в соответствии с планом эксперимента. В качестве контрольного использовался образец бетона без покрытия. Результаты определения водопоглощения (W_m) приведены на рисунке 108.

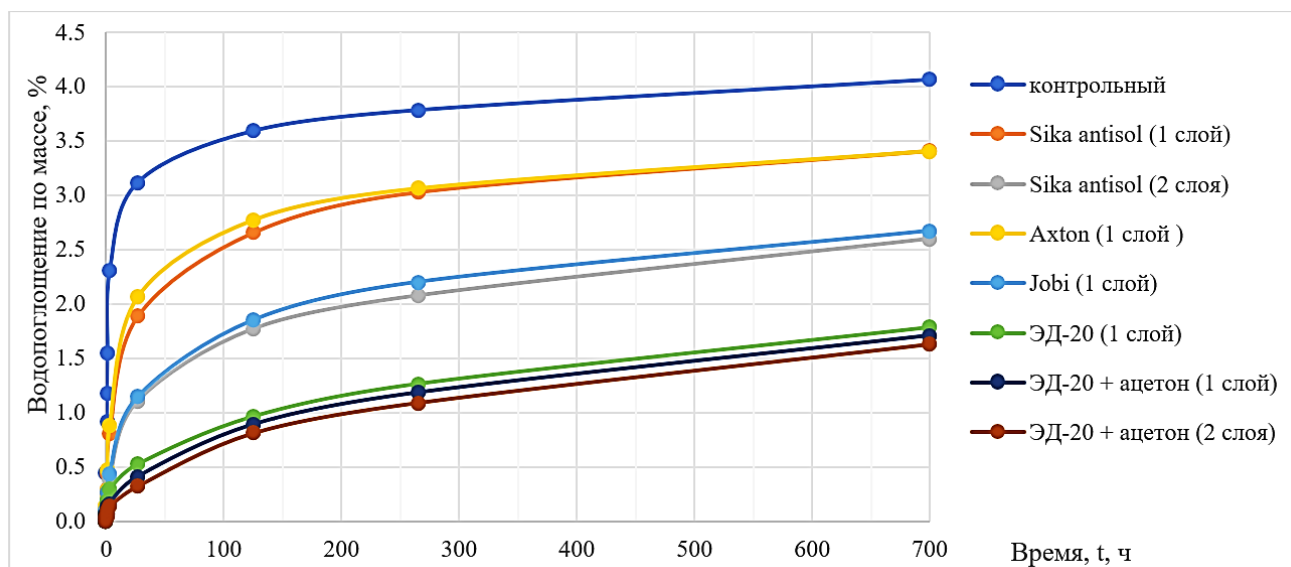


Рисунок 108 – Кинетика водопоглощения образцов разработанного бетона с гидрофобизирующими покрытиями

Как видно из графиков рисунка 108, наилучшие результаты демонстрируют покрытия на основе эпоксидной диановой смолы ЭД-20 (снижение W_m на 67,5 %). Также можно отметить снижение водопоглощения образцов на 45 % в сравнении с контрольным в случае двухслойного нанесения добавки Sika Antisol. Исходя из полученных результатов, для защиты бетонных конструкций, применяемых в области промышленного строительства, предпочтительно использовать двухслойное покрытие эпоксидной смолой с добавкой ацетона.

5.3 Исследование свойств разработанных высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов в различных режимах работы

В процессе численного моделирования для оценки жесткости конструкции и определения поля механических напряжений использовались три схемы нагружения:

1. Статическая нагрузка ($F=160$ Н), приложенная к закладной детали опоры ходового винта вдоль оси «X», включающая сумму максимальной силы инерции, создаваемой движущимися элементами по оси «X», и компоненты силы резания вдоль этой оси.
2. Распределенная статическая нагрузка ($F=145$ Н), приложенная нормально к закладным деталям направляющих оси «X», включала сумму максимальной силы инер-

ции, создаваемой движущимся рабочим столом с заготовкой по оси «Y», и компоненты силы резания вдоль этой оси.

3. Статическая нагрузка, создаваемая моментом осевой силы резания ($P_z=240$ Н) при сверлении, прикладывалась к закладным деталям направляющих оси «X».

Результаты численного моделирования представлены на рисунке 109.

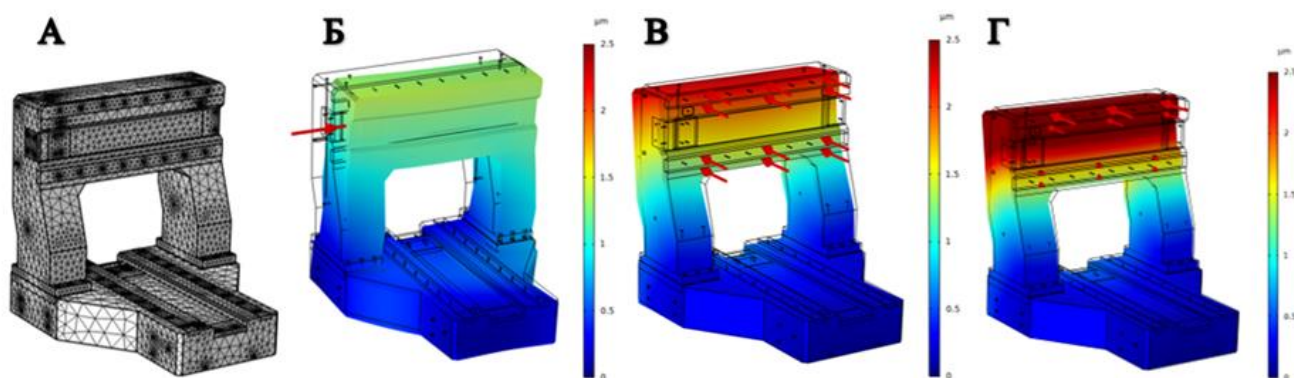


Рисунок 109 – Результаты численного моделирования:

А – конечно-элементная сетка; Б–Г – распределение результирующих перемещений при схемах нагружения 1–3 соответственно

При определении эквивалентных напряжений учитывались наиболее неблагоприятные комбинации сил, возникающих в процессе движения несущих элементов и воздействия силы резания (рисунок 110).

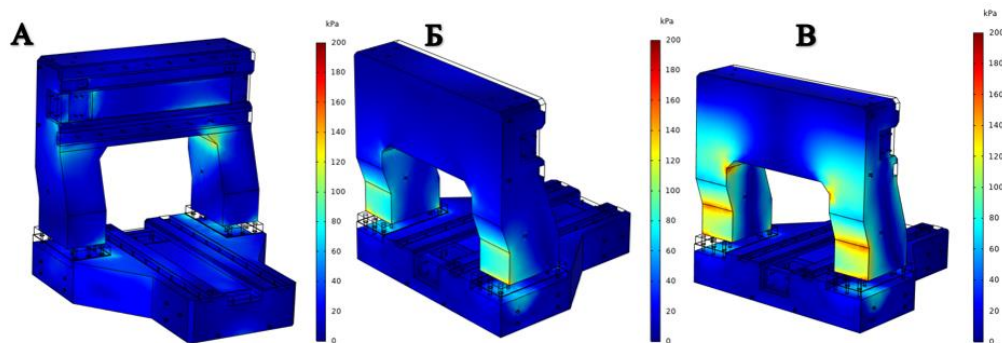


Рисунок 110 – Распределение эквивалентных напряжений в бетоне при схемах нагружения 1(А), 2(Б), 3(В)

Анализ результатов моделирования показал, что при рассматриваемых схемах нагружения результирующие перемещения конструкции не превышают 2,5 мкм, а предельные эквивалентные напряжения составляют 0,23 МПа, что является приемлемым показателем.

Определение собственных частот и форм колебаний конструкции станины было произведено посредством модального анализа. В таблице 28 представлены данные об эффективной модальной массе для первых 14 собственных частот.

Таблица 28 – Результаты модального анализа

№ режима колебаний	Собственная частота, Гц	Эффективная модальная масса					
		смещение по оси (кг)			вращение по оси (кг·м ²)		
		X	Y	Z	X	Y	Z
1	170.38	0.00	62.42	0.24	2.77	0.00	0.00
2	274.61	73.19	0.00	0.00	0.00	2.81	0.52
3	411.98	0.70	0.00	0.00	0.00	0.04	1.71
4	721.12	0.00	1.03	116.21	0.11	0.00	0.00
5	864.48	0.00	24.03	6.57	0.14	0.00	0.00
6	888.36	2.99	0.00	0.00	0.00	0.31	0.73
7	1093.1	20.96	0.41	0.07	0.02	3.29	0.18
8	1095.1	0.60	14.08	2.65	0.76	0.09	0.00
9	1350.6	0.00	11.11	1.17	0.02	0.00	0.00
10	1371.2	2.56	0.00	0.00	0.00	0.05	1.00
11	1405.5	0.03	17.21	0.04	1.57	0.00	0.00
12	1422.6	26.85	0.01	0.00	0.00	0.76	0.13
13	1497.7	0.00	0.91	4.25	1.00	0.00	0.00
14	1873.1	0.00	2.01	3.33	0.23	0.00	0.00

На рисунке 111 визуализированы формы колебаний, соответствующие первым восьми собственным частотам: 1 – колебания портала в плоскости YZ (клевки портала); 2 – колебания портала в плоскости XZ (складывание в параллелограмм); 3 – закручивание портала относительно оси Z; 4 – выгибание портала и нижней части станины вдоль оси Z; 5 – колебания портала в плоскости YZ и нижней части станины вдоль оси Z; 6 – закручивание нижней части относительно оси Y; 7 – закручивание портала относительно оси Z с противофазными продольными колебаниями стоек, закручивание нижней части относительно оси Y; 8 – выгибание портала и нижней части вдоль оси Z. Более высокие собственные частоты отличаются преобладанием локальных колебаний и колебаний узлов подвижных несущих элементов и имеют меньшую практическую значимость при конструировании станины.

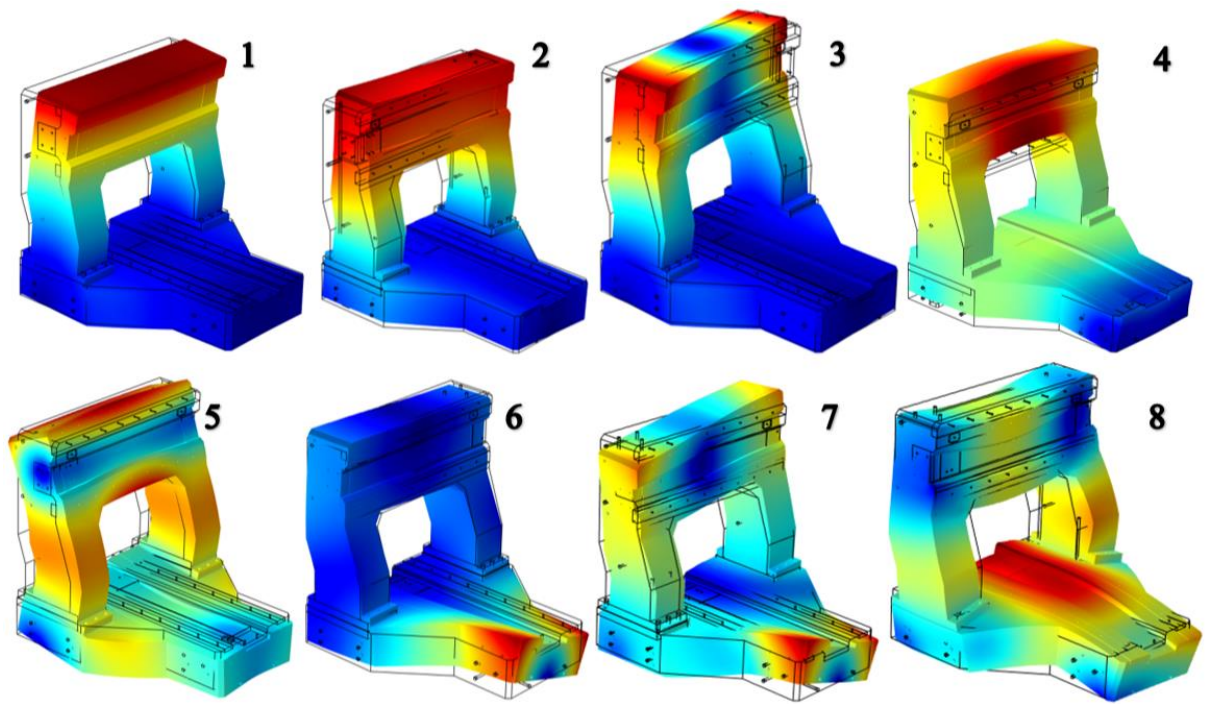


Рисунок 111 – Формы колебаний бетонной конструкции станины

Полученные результаты свидетельствуют, что наибольшее массовое участие наблюдается при 1, 2 и 4 режимах колебаний. Можно отметить, что при 1–3 режимах колебаний в колебательный процесс практически не вовлечена нижняя часть конструкции.

Для оценки максимальных перемещений при динамическом воздействии был произведён гармонический анализ. На рисунках 112 и 113 представлены графики динамической податливости вдоль осей X, Y и Z в частотном диапазоне 0–1000 Гц при нагружении в направлении Y и Z.

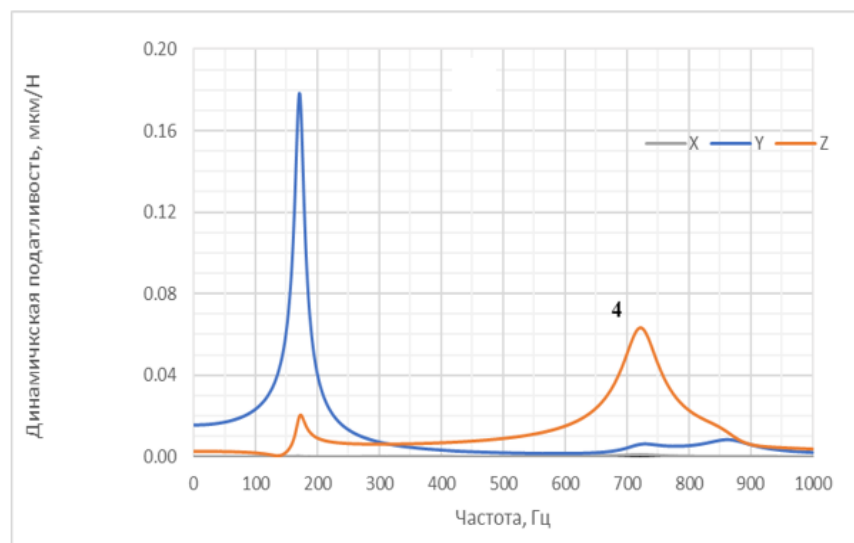


Рисунок 112 – Результаты гармонического анализа вибронгруженной бетонной конструкции: нагружение в направлении «Y»

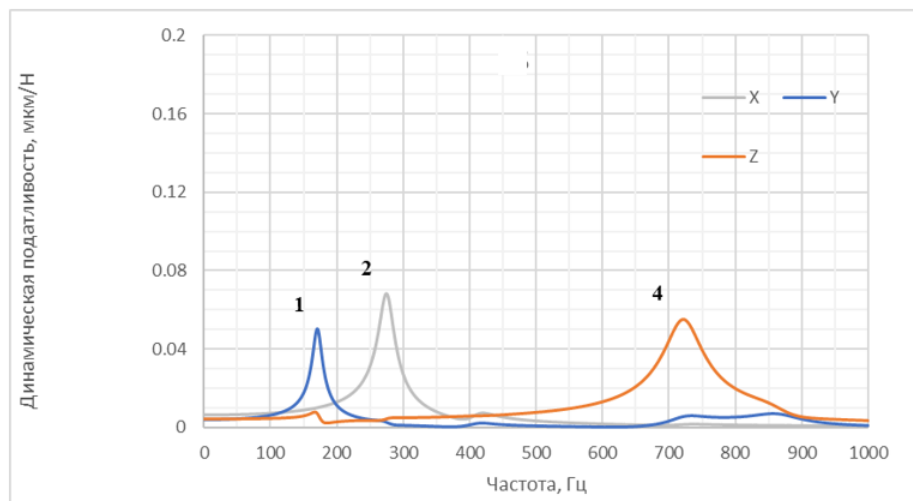


Рисунок 113 – Результаты гармонического анализа вибронегруженной бетонной конструкции: нагружение в направлении «X»

Установлено, что наиболее опасным является первый режим колебаний ($f=170,4$ Гц), характеризующийся динамической податливостью $0,18$ мкм/Н вдоль оси Y при нагружении в направлении Y. Также можно отметить заметное влияние второго и четвертого режимов, что согласуется с результатами модального анализа. Полученные данные, подтверждённые натурными экспериментами, целесообразно использовать при определении наиболее неблагоприятных частотных диапазонов промышленного оборудования. Важно отметить отсутствие собственных частот колебаний бетонной станины в диапазоне $0-170$ Гц, что нехарактерно для крупно- и среднеформатных металлорежущих токарных [52, 61] и фрезерных станков [49].

5.4 Описание принципиальной технологической схемы получения высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов

Для разработки технологии производства и расчета укрупненных экономических показателей на первоначальном этапе производился выбор способа производства бетонных изделий. Анализ опубликованных работ [130] показал, что в случае формирования крупноформатных бетонных изделий со сложной конфигурацией (станины и основание обрабатывающего оборудования, опорные плиты и рамы вибропрессов, фундаменты вибрационных грохотов, компрессоров и насосных установок, подмостовые балки и ригели машиностроительных цехов, корпуса виброплощадок и формовочных установок, основания центрифуг и турбинных агрегатов) рационально использовать стендовый

способ производства. Он обеспечивает высокую эффективность выпуска изделий широкой номенклатуры и ускоренную переналадку оборудования, а использование термомформ упрощает процесс тепловлажностной обработки. Недостатком стандового способа является увеличение требуемой площади в сравнении с агрегатным и конвейерным производствами. При изготовлении бетонных и железобетонных конструкций, подвергающихся циклическому механическому воздействию в процессе эксплуатации, требуется повышенная точность позиционирования закладных деталей в объеме бетона. Учитывая это, использование стационарных форм гарантирует стабильность смонтированных в форме элементов в процессе заливки и формирования бетонной смеси.

Суммируя изложенное выше, стандовый способ производства был выбран для дальнейших расчетов.

В качестве вяжущего рекомендуется использовать портландцемент типов ЦЕМ 0 и ЦЕМ 1 классов по прочности не ниже 42,5 и фактической прочностью при сжатии в возрасте двое суток не менее 30 МПа с равномерностью изменения объема (расширением) не более 8 мм в соответствии с ГОСТ 31108-2020 и ГОСТ 30515-2013. Микрокремнезём (ГОСТ Р 58894-2020) должен быть неуплотнённым и обладать пуццоланической активностью не менее 90 мг/г и удельной поверхностью не менее 18000 м²/кг. Минеральным наполнителем является кальцитовая или кварцевая мука с массовой долей CaCO₃ или SiO₂ соответственно не ниже 97 %. Кварцевый песок (ГОСТ 8736-2014) должен быть первого класса с массовой долей пылеватых и глинистых частиц не более 2 % и содержанием глины в комках не более 0,25 %. Заполнитель должен быть получен дроблением магматических горных пород с маркой по дробимости не менее 1200 и содержать зёрна пластинчатой и игольчатой формы не более 5 % по массе (1 группа по лещадности). Пластифицирующая добавка должна быть в виде порошка и обладать показателем водоредуцирования не ниже 30 %. Вода для приготовления бетонной смеси должна соответствовать требованиям ГОСТ 23732-2011. Максимальное допустимое содержание растворимых солей, ионов SO₄²⁻, ионов Cl⁻ и взвешенных частиц не должно превышать 2000, 400, 400, 200 мг/л соответственно. Вода не должна содержать нефтепродуктов, жиров и поверхностно-активных веществ со стойкостью пены более 2 мин. Водородный показатель воды должен быть не менее 4 и не более 12,5.

Производство бетонной смеси и последующее изготовление из неё железобетонных элементов для станкостроения представляет собой более технически и технологи-

чески сложный процесс, чем производство обычных строительных железобетонных изделий. Несмотря на то, что основные этапы и технологические процессы традиционны для предприятий строительной индустрии, существуют важные отличия в требованиях к сырьевым материалам и особенностям технологии.

С учетом результатов проведенных исследований и методологии получения образцов материала в условиях лаборатории промышленная технологическая линия по производству изделий из ВФСУБ должна включать следующие основные технологические этапы:

- 1 Подготовка и дозирование сырьевых компонентов;
- 2 Приготовление раствора химических добавок;
- 3 Гомогенизация порошковых компонентов;
- 4 Приготовление бетонной смеси;
- 5 Подготовка форм;
- 6 Укладка бетонной смеси в формы;
- 7 Автоклавная обработка изделий;
- 8 Механическая обработка поверхностей закладных деталей (при необходимости), нанесение защитного покрытия (при необходимости), складирование готовой продукции.

При составлении описания технологического процесса руководствовались рекомендациями по технологии изготовления конструкций из высокопрочных бетонов (Москва: НИИЖБ, 1987).

Для улучшения качества перемешивания и повышения однородности бетонных смесей цемент вводится в две стадии. На первой следует загрузить заполнители, примерно 50 % всего требуемого количества цемента и 60–70 % воды затворения, перемешать их в течение 1–2,5 мин, а затем добавить оставшееся количество воды и цемента и дополнительно перемешать бетонную смесь в течение 2–3,5 мин. Пластификатор вводится с объёмом воды затворения.

При использовании пластифицирующих добавок, обладающих способностью к воздухововлечению, вводить их в бетонную смесь на второй стадии. При необходимости вводить специальные добавки пеногасители (например, ПГ-5 в количестве 0,1–0,5 % от массы цемента).

Для снижения вязкости бетонной смеси и энергоемкости ее приготовления, а также с целью замедления потери подвижности ее температура не должна превышать 30 °С.

Высота падения смесей при выгрузке из смесителя при укладке их в формы не должна превышать 1,5 м, при большей высоте падения необходимо устанавливать инвентарные лотки, хоботы, перегрузочные средства для предотвращения расслоения смесей.

Готовые бетонные смеси укладывают в формы без вибрационного уплотнения. Для обеспечения плотности их укладки в местах расположения закладных деталей и на густоармированных участках арматурных каркасов рекомендуется использовать вибрирование кратковременными импульсами продолжительностью по 2–5 с с паузами между ними.

Укладывать и уплотнять смеси для конструкций с высотой сечения более 30 см следует послойно без перерывов в бетонировании.

При укладке бетонных смесей в конструкции с наклонной поверхностью, последующем транспортировании и установке форм в тепловые агрегаты уклон открытой поверхности свежееуложенного бетона не должен превышать 3 % для обеспечения правильной формы и соблюдения геометрических размеров изделий и конструкций.

С учетом повышенной адгезии бетонных смесей для высокопрочных бетонов на формы следует наносить качественные смазочные материалы (обратно-эмульсионную смазку ОЭ-2, парафино-вазелиновую и др.).

С учетом повышенной экзотермии высокопрочных бетонов при надежной теплоизоляции тепловых агрегатов целесообразно использовать термосные режимы тепловлажностной обработки, включающие подъем температуры до 60–80 °С в течение 2–2,5 ч и последующее выдерживание изделий без подачи пара или с ограниченной ее продолжительностью.

Температурный перепад между поверхностью изделий и окружающей средой на стадии их охлаждения и при выемке из теплового агрегата не должен превышать 30 °С. Для уменьшений тепло- и влагообмена бетона с окружающей средой, снижения возникающих напряжений и обеспечения дальнейшего роста прочности бетона рекомендуется укрывать изделия после пропаривания брезентом, пленкой или другими покрытиями.

Для дополнительного снижения усадки на поздней стадии возможно проводить автоклавную обработку при температуре 140 °С и давлении 3–5 атм в течение 2–4 часов.

При изготовлении конструкций из ВФСУБ необходимо тщательно контролировать качество исходных материалов, проводить пооперационный контроль за всеми технологическими процессами приготовления, транспортирования, уплотнения бетонной смеси, режимами твердения бетона и выходной контроль качества бетона и конструкций, обеспечивающий отгрузку потребителям только кондиционных изделий и конструкций.

После окончания перемешивания отбирают пробы (по ГОСТ 10181.0) для проверки плотности, удобоукладываемости и расслаиваемости бетонной смеси. Оценку удобоукладываемости начинают не ранее 15 мин после начала перемешивания смеси с водой. Если свойства бетонной смеси не соответствуют каким-либо требованиям, вносят корректировку составов до получения в замесе каждого состава смеси с заданными свойствами.

При контроле за приготовлением растворов добавок необходимо систематически проверять их плотность ареометрами с точностью $\pm 0,01$ г/см³.

При контроле за укладкой и уплотнением бетонной смеси следует обеспечивать строгое соответствие удобоукладываемости смеси проектным требованиям на протяжении всего периода формования изделий. Удобоукладываемость необходимо определять на формовочном посту не реже одного раза в смену. При этом расплыв из конуса Хагерманна должен превышать 270 мм. Не реже одного раза в смену производят контроль расслаиваемости бетонной смеси.

Бетонную смесь, которая не удовлетворяет требованиям задания по удобоукладываемости, корректируют с добавлением воды, цемента, заполнителей и добавок в необходимых количествах. Корректировку производят с учетом фактической плотности смеси.

Выходной контроль и оценку качества бетона следует осуществлять по действующим стандартам, в том числе прочности – по ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 17624-2012, ГОСТ 18105-2018; морозостойкости – по ГОСТ 10060-2012, водонепроницаемости – по ГОСТ 12730.5-2018, водопоглощения – по ГОСТ 12730.3-2020.

Принципиальная технологическая схема производства изделий из ВФСУБ представлена на рисунке 114.



Рисунок 115 – Общий вид оборудования для изготовления ВФСУБ
(номера в соответствии с технологической схемой рисунок 114)

На предварительном этапе производится смешивание порошковых компонентов (портландцемент, каменная мука, микрокремнезём, сульфалюминатная добавка). После гомогенизации часть полученного композиционного вяжущего отбирается для последующего отпуска в качестве готовой продукции. Химические добавки дозируются и поступают в предварительный смеситель, где готовится их водный раствор, который впоследствии будет использоваться для затворения. Следующим этапом является получение бетонной смеси. Компоненты, поступающие на бетоносмесительный узел (композиционные вяжущие, заполнители, раствор химических добавок), дозируются, после чего происходит их смешивание в двухвальном бетоносмесителе. Часть готовой бетонной смеси отбирается для отпуска в качестве готовой продукции. А основная часть поступа-

ет в формовочный цех. Поскольку используется стендовый способ производства, формы готовятся к заливке непосредственно на месте формования. Перед установкой закладных деталей формы смазываются. Закладные детали и арматурные каркасы готовятся на соответствующем участке. После установки закладных деталей происходит контроль их положения в формах. Бетонная смесь подаётся к формам в бадье, перемещаемой мостовым краном. После формования происходит тепловлажностная обработка в формах. После набора достаточной прочности изделия извлекаются из форм и помещаются для обработки в автоклав. После чего изделия выдерживаются на воздухе при заданном температурно-влажном режиме и после прохождения основной усадки поступают на пост механообработки, после которой производится контроль геометрических параметров поверхностей закладных деталей. На финальном этапе наносится защитное покрытие, и изделие поступает на склад готовой продукции.

Результаты подбора и оценки стоимости основного оборудования приведены для годовой производственной программы мощностью 30 тыс. м³ (таблица 29).

Таблица 29 – Ведомость основного производственного оборудования (номера в соответствии с технологической схемой на рисунке 115)

No	Наименование оборудования	Модель, характеристики	Количество, шт.	Цена единицы, руб	Стоимость, руб
1	Силос для портландцемента	Elkon СТЦ 500 (500 т 384 м ³)	2	4800000	9600000
2	Силос для расширяющей добавки	TTC-100-P (95 т 63 м ³)	1	1168100	1168100
3	Силос для каменной муки	TTC-290-P (286 т 191 м ³)	2	2857900	5715800
4	Ёмкость для модификатора поверхностного натяжения	VERT 2×6000 (6 м ³)	1	271300	271300
5	Бункер для пластифицирующей добавки	БСК-9Ц (9 м ³)	1	115980	115980
6	Резервуар для воды затворения	PBC-50 (50 м ³)	2	88000	176000
7	Машина для промывки заполнителей	ПМК-2600	2	1070000	2140000
8	Виброгрохот для фракционирования заполнителей	SZF-1030	4	807576	3230304

9	Система пневмотранспортировки портландцемента	Тензотехсервис Т40 (40 т/ч)	1		
10	Система пневмотранспортировки расширяющей добавки	Тензотехсервис Т10 (10 т/ч)	1		
11	Система пневмотранспортировки каменной муки	Тензотехсервис Т20 (20 т/ч)	1		
12	Электронный дозатор пластифицирующей добавки	М8500-100-0,2-П (0,1 т)	1	428957	428957
13	Блок дозаторов цемента и воды	БД-120	1	1496160	1496160
14	Блок дозаторов минеральных добавок, расширяющей добавки и модификатора поверхностного натяжения	БД-90	2	1234920	2469840
15	Дозатор заполнителей	ДЗ-36 (3 по 12 м³)	1	2816000	2816000
16	Смеситель для приготовления раствора химических добавок	ZhiTong500 (1 м³)	1	402079	402079
17	Гомогенизатор сухой смеси	ТУРБОМИКС СМ 2000 (2 м³)	1	3299120	3299120
18	Двухвальный бетоносмеситель	SICOMA MAO 3000	1	4790040	4790040
19	Станок для гибки арматуры	TCC GW 40B	2	136065	272130
20	Машина для контактной стыковой сварки	МСО-201	2	850000	1700000
21	Сверлильно-фрезерный станок с ЧПУ	СЦ3012	1	7780000	7780000
22	Кран мостовой специальный с двумя тележками	Атлант20 (20 т)	2	2194000	4388000
23	Автоклав горизонтальный	FGZSS (40 м³)	1	5000000	5000000
24	Электрический двухбалочный мостовой кран	20 т	1	3299875	3299875
сумма, руб					60559685

Приведенные данные позволили произвести приблизительную оценку стоимости оборудования технологической линии предприятия.

5.5 Оценка экономической эффективности разработанных составов

В таблице 30 приведены результаты расчётов по оценке себестоимости 1 м³ разработанных ВФСУБ.

Таблица 30 – Оценка себестоимости 1 м³ ВФСУБ (по рыночным ценам на 2025 г.)

Компонент	Расход, кг	Цена за кг, руб	Стоимость, руб
Разработанный состав			
Портландцемент	690	9,5	6552
Микрокремнезём	55	18	993
Микрокальцит	179	5,5	986
Песок кварцевый (фр. 0,16–0,63)	241	0,38	92
Песок кварцевый (фр. 0,63–2,5)	154	0,6	93
Гранитный заполнитель (фр. 2,5–5)	811	1,1	892
Расширяющаяся добавка (CSA)	41	24,5	1014
Бутилцеллозольв	6,9	126	869
Гиперпластификатор (Sika 226-p)	5,5	615	3393
Вода	186	0,036	7
Общая стоимость компонентов бетонной смеси, руб			14890
Состав на основе вяжущего Nanodur			
Nanodur Compound 5941	1050	36,4 (0,4 €)	38220
Песок кварцевый (фр. 0–2,5)	430	0,45	194
Гранитный заполнитель (фр. 2,5–5)	880	1,1	968
Гиперпластификатор (Melflux 5581f)	14	1800 (20 €)	25200
Противоусадочная добавка Eclipse Floor 200	6	1250 (14 €)	7500
Вода	160	0,036	6
Общая стоимость компонентов бетонной смеси, руб			72087

На основании анализа данных в таблице 30 можно сделать вывод, что разработанные составы являются экономически эффективными в сравнении с существующими аналогами (Nanodure). Так себестоимость разработанного ВФСУБ составляет 14890 руб/м³, а бетонной смеси на основе Nanodure – 72087 руб/м³. Таким образом экономический эффект при годовом выпуске бетонных изделий 30 тыс. м³ в случае использования разработанных составов ВФСУБ составит 1715900 тыс. рублей.

Выводы по главе 5

1. Результаты проведенных исследований подтвердили практическую возможность применения разработанного высокопрочного самоуплотняющегося бетона в промышленном строительстве и станкостроении для изготовления конструкций с улучшенными вибродинамическими показателями. Практическая апробация позволила уточнить требования к бетонной смеси и бетону для изготовления базовых деталей промышленного оборудования методом литья. По результатам испытаний разработанных составов в составе экспериментальных прототипов (конструкций) установлено, что разработанные ВФСБ не уступают зарубежному аналогу, взятому в качестве эталона сравнения на начальном этапе проведения диссертационных исследований.

2. Разработан проект малогабаритного фрезерного станка со сборной железобетонной станиной. Конструкция станины оптимизировалась с учётом данных численного моделирования. По итогам модального и гармонического анализов определены следующие наиболее благоприятные частотные диапазоны станины: дорезонансный (0–120 Гц), межрезонансный (330–650 Гц), зарезонансный (>850 Гц).

3. В соответствии с проектом были отформованы верхняя и нижняя часть станины из высокопрочного самоуплотняющегося бетона и собран прототип станка.

4. На примере изготовления и эксплуатации несущего бетонного каркаса металлорежущего станка подтверждена техническая целесообразность применения бетонных базовых деталей в конструкциях промышленного назначения, подвергающихся циклическим нагрузкам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

В результате диссертационного исследования теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность создания ВФСУБ с заранее заданными вибродинамическими свойствами для изготовления способом свободной заливки промышленных и специальных конструкций, реализованная путем введения в рецептуру, наряду с поликарбоксилатными пластификаторами и микронаполнителями, расширяющих сульфоалюминатных добавок в сочетании с добавкой-регулятором поверхностного натяжения (бутилцеллозольв), на макроуровне заметное улучшение демпфирующих показателей достигается за счет аппретирования поверхности крупного заполнителя эластичным полимером (силиконом), а на микроуровне – увеличением содержания кристаллов этtringита при некотором снижении степени закристаллизованности системы:

1. Установлено, что вибропоглощающие свойства бетонов регулируется изменением минерально-фазового состава цементного камня за счет увеличения относительного содержания кристаллов этtringита. Повышение дозировки сульфоалюминатной расширяющей добавки с 5 до 15 % (от ПЦ) приводит к росту логарифмического декремента на 4,3–17,4 %, а введение 2 % бутилцеллозольва усиливает данный эффект на 4–5 %.

2. Установлен рост величины логарифмического декремента затухания бетона в 1,22 раза при увеличении удельного расхода ПЦ с 300 до 734 кг/м³, обусловленный общим снижением объёмной доли кристаллических фаз вследствие замещения части компонента (мраморной муки) цементным камнем, содержащим гелевые фазы (C-S-H). Снижение содержания пуццолановых добавок приводит к улучшению демпфирования бетона на 5–15 %, что связано с подавлением процесса роста фазы этtringита, при этом влияние микрокремнезёма меньше в сравнении с метакаолином.

3. Показано, что модификация поверхности крупного заполнителя силиконовым слоем позволяет эффективно абсорбировать энергию отклика первой моды при вибрационном воздействии. Анализ диаграмм свободных колебаний показал, что введение в состав рецептуры до 5 % заполнителя в виде стальных шариков с демпфирующим покрытием увеличивает коэффициент затухания бетона на 45–60 %.

4. Введение в бетон до 2 % волокон (по объёму) полимерной фибры приводит к снижению величины E_d на 3–5 % при неизменной величине демпфирования, а стальной

фибры – повышает на 7–8 % E_d , снижая декремент затухания на 30 %. Увеличение содержания стальных волокон до 3 % сопровождается ростом прочности на сжатие со 136 до 153 МПа и на изгиб (от 18 до 35,4 МПа) и увеличением модуля упругости на 20–23 %.

5. Исследование влияния пластификаторов и микродобавок на гидратацию цементных матриц методом полуадиабатической калориметрии показало, что поликарбоксилатная добавка (Sika ViscoCrete 226-P) увеличивает продолжительность индукционного периода на 20–22 %, снижая максимальную температуру гидратации на 23–25 %.

6. Установлено повышение плотности и прочности ВФСУБ при добавлении бутилцеллольва, обладающего пластифицирующим действием: предельное напряжение сдвига снижается в 1,12–1,14 раза при добавлении 1–1,5 % добавки. На примере Denka CSA20 доказано, что добавление бутилцеллольва к дорогостоящей сульфоалюминатной расширяющейся добавке обеспечивает получение безусадочных составов при одновременном снижении её расхода в 1,6 раза. Максимальное значение E_d наблюдается у составов с содержанием расширяющейся добавки 4–6 % при отсутствии модификатора поверхностного натяжения (бутилцеллольв). Повышение расхода Denka CSA20 до 12 % сопровождается снижением E_d и ростом величины демпфирования, что свидетельствует о повышении структурной неоднородности цементного камня.

7. Мультифизическое моделирование работы ВФСУБ в вибронагруженных конструкциях, реализованное посредством CAE-систем, и дополненное натурным экспериментом на прототипе оборудования, показало хорошую сходимость результатов данных модального анализа и эксперимента в диапазоне рабочих частот 0–1000 Гц. На примере станин показано минимальное отклонение (1–5 %) численной модели и результата измерения первой собственной частоты для исследованных бетонных конструкций.

8. Показана техническая возможность создания испытательной системы вибродинамических исследований из доступных электронных и электромеханических компонентов. Информативное исследование бетонов при вибродинамическом воздействии реализовано на экспериментальном оборудовании, сочетающем преимущества двух методов испытаний: оценка вынужденных колебаний позволяет дополнительно определять показатели вибростойкости и усталостной прочности, а фиксирование свободных колебаний даёт возможность находить величину δ в течение двух–трех минут, включая ранние стадии твердения материала.

9. Установлено, что для резонансного метода оптимальной является консольная схема закрепления образцов, обеспечивающая эффективную оценку отклика работы материала при генерации поперечных колебаний в широком частотном диапазоне (0–1000 Гц). Корректные экспериментальные данные получены, если параметры программного кода микроконтроллера предусматривают генерацию вибрационного воздействия со ступенчато изменяющейся частотой в диапазоне ± 50 Гц от резонансной частоты с шагом 0,1 Гц и продолжительностью ступени 0,1 с.

10. Показано, что усредненные массивы экспериментальных данных демонстрируют обратную зависимость показателей демпфирования от динамического модуля упругости бетона. Однако в рамках отдельных рецептов имеется возможность существенного изменения соотношения между демпфирующими и деформативными характеристиками бетона, что позволяет решать задачи оптимизации ВФСУБ по заранее заданным вибродинамическим показателям.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы

Изучение и описание процессов прохождения волн механических напряжений в цементных бетонах осложнено высокой неоднородностью их структуры. Если в кристаллических веществах большая часть потерь является гистерезисной, вызванной движением дислокаций, то в бетонах, обладающих высокой гетерогенностью структуры, значительное рассеивание энергии происходит на многочисленных межфазовых границах как из-за «проскальзывания» структурных элементов, так и по причине отражения и преломления упругих волн. Дискуссионный характер носят и вопросы оптимизации вибродинамических параметров материала, поскольку демпфирование и деформативность являются разнонаправленными характеристиками. Результаты проведенных экспериментов показали, что в определённом диапазоне доступно регулирование соотношения демпфирующих и деформативных свойств бетона с помощью минеральных и химических добавок. В целом, учитывая малые деформации при вибрационном воздействии, модификация структуры цементных конгломератов на нано- и микрометрическом масштабном уровнях открывает перспективы для дальнейших исследований в рамках разработки рецептов высокофункциональных бетонов с улучшенными вибродинамическими показателями.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВФБ – высокофункциональный цементный бетон

ВФСУБ – высокофункциональный самоуплотняющийся цементный бетон

UHPC – Ultra-High Performance Concrete

СОЖ – смазочно-охлаждающая жидкость

Ц – портландцемент

САБ – суперабсорбирующий компонент

ρ_m – средняя плотность

$F_{\text{разр}}$ – разрушающая нагрузка

$R_{\text{сж}}$ – предел прочности при сжатии

$R_{\text{изг}}$ – предел прочности при изгибе

K_c^* – условный критический коэффициент интенсивности напряжений

E – модуль упругости

E_d – динамический модуль упругости

G – модуль сдвига

μ – коэффициент Пуассона

δ – логарифмический декремент затухания

ζ – коэффициент демпфирования

η – коэффициент конструкционного демпфирования (фактор потерь)

f_r – частота резонанса

α – линейное термическое расширение

λ – теплопроводность

a – температуропроводность

C_m – удельная теплоемкость

σ – поверхностное натяжение

W_m – водопоглощение по массе

н.у. – нормальные условия

В/Ц – водоцементное отношение

В/Т – водотвёрдое отношение

$I_{\text{ид}}$ – критерий избытка абсолютного объема цементно-дисперсной матрицы над объемом песка

$I_{цдп}$ – критерий избытка абсолютного объема цементно-дисперсно-песчаной матрицы над объемом щебня

$D_{распл}$ – диаметр расплыва смеси при истечении из конуса/ цилиндра, мм

Γ – относительная степень растекания

M – молярная масса

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тригалеv В.Н., Чеботаревич В.О., Скоробогатов С.М. Железобетонные станины металлорежущих станков. МАШГИЗ, 1960. 97 с.
2. Liang C., Xiao J., Wang Y., Wang C., Mei S. Relationship between internal viscous damping and stiffness of concrete material and structure // *Structural Concrete*. 2021. Т. 22, № 3. Р. 1410–1428.
3. Liang C., Liu T., Xiao J., Zou D., Yang Q. The damping property of recycled aggregate concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. Т. 102. Р. 834–842.
4. Zhang W. и др. Investigating the influence of multi-walled carbon nanotubes on the mechanical and damping properties of ultra-high performance concrete // *Science and Engineering of Composite Materials*. 2020. Т. 27. Р. 433–444.
5. Ashby M.F. *Materials selection in mechanical design*. 3rd ed. Oxford (Conn.): Elsevier/Butterworth Heinemann, 2005. 602 p.
6. Ерёмин И.А., Попова Е.А. Методика перехода к низкоуглеродной экономике компаний ТЭК России // *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2023. №1. С. 43–48.
7. Россия и углеродный рынок [Электронный ресурс]. URL: <https://climate-change.moscow/materials/undefined/materials/rossiya-i-uglerodnyy-rynok> (дата обращения: 29.06.2025).
8. Графкина М.В., Свиридова Е.Ю., Сдобнякова Е.Е. Новые подходы к оценке экологических показателей строительных материалов: 9 // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. Россия, Белгород: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2016. № 9. С. 15–21.
9. Möhring H.-C., Brecher C., Abele E., Fleischer J., Bleicher F. Materials in machine tool structures // *CIRP Annals*. 2015. Т. 64, № 2. Р. 725–748.
10. Beuth Verlag. DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton-Teil: 1 // *Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformitt*. 2001. Т. 2.

11. Mechtcherine V., Muller H.S. Fracture behaviour of High Performance Concrete. Finite Elements in Civil Engineering Applications // Balkema Publishers. 2002. P. 35–44.
12. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: АСВ, 2006. 306 с.
13. Каприелов С.С., Чилин И.А. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций: 7 // Строительные материалы, 2013. № 7. С. 28–30.
14. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Чилин И.А. О подборе составов высококачественных бетонов с органоминеральными модификаторами: 12 // Строительные материалы, 2017. № 12. С. 58–63.
15. Калашников В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2008. № 10. С. 4–6.
16. Aïtcin P.-C., Flatt R.J. Science and technology of concrete admixtures. Woodhead publishing, 2015. 617 p.
17. Afroughsabet V., Ozbakkaloglu T. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers // Construction and Building Materials. 2015. T. 94. P. 73–82.
18. Мещерин В.С. Высокопрочные и сверхпрочные бетоны: технологии производства и сферы применения // СтройПРОФИЛЬ. 2008. № 8(70). С. 32–35.
19. Лавров И.Ю. Перспективы применения цементных бетонов для изготовления базовых деталей станков // Сборник материалов XV Международной научно-технической конференции: Теория и практика повышения эффективности строительных материалов. Пенза: ПГУАС, 2021. С. 98–106.
20. Schlesinger G. Substitute materials in time of war // The Journal of the Institution of Production Engineers. 1940. № 19. P. 259–279.
21. Sugishita H., Nishiyama H., Nagayasu O., Shin-nou T., Sato H., O-hori M. Development of Concrete Machining Center and Identification of the Dynamic and the Thermal Structural Behavior // CIRP Annals. 1988. T. 37, № 1. P. 377–380.
22. Sagmeister B. On the way to micrometer scale : Applications of UHPC in machinery construction. Kassel, 2012.

23. Kleiner M., Curbach M., Tekkaya A.E., Ritter R., Speck K., Trompeter M. Development of ultra high performance concrete dies for sheet metal hydroforming // *Prod. Eng. Res. Devel.* 2008. Т. 2, № 2. Р. 201–208.
24. Применение сверхвысокотехнологичного бетона на основе специального вяжущего Nanodur® Compound 5941 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cpi-worldwide.com/ru/journals/artikel/23781> (дата обращения: 19.03.2023).
25. Wills-Moren W.J., Modjarrad H., Read R.F.J., McKeown P.A. Some Aspects of the Design and Development of a Large High Precision CNC Diamond Turning Machine // *CIRP Annals*. 1982. Т. 31, № 1. Р. 409–414.
26. Хвастунов В.Л., Махамбетова К.Н., Лавров И.Ю., Хвастунов А.В. Об опыте изготовления станины разрывной малогабаритной установки из высокопрочного реакционно-порошкового бетона с низким удельным расходом цемента на единицу прочности // *Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование*. 2021. № 1 (12). С. 50–56.
27. Rahman M., Mansur M.A., Chua K.H. Evaluation of Advanced Cementitious Composites for Machine-Tool Structures // *CIRP Annals*. 1988. Т. 37, № 1. Р. 373–376.
28. Rahman M., Mansur M.A., Lee L.K., Lum J.K. Development of a polymer impregnated concrete damping carriage for linear guideways for machine tools // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2001. Т. 41, № 3. Р. 431–441.
29. Dou K. Thermisch bedingtes Deformationsverhalten von Mineralguss-MetallVerbundkonstruktionen in Werkzeugmaschinen: PhD thesis. Magdeburg: Otto von Guericke Universität, 1995. 149 p.
30. Neugebauer R., Drossel W.-G., Ihlenfeldt S., Nestmann S., Richter C. Inherent thermal error compensation of machine tool structures with grated mineral casting // *International Conference on Machine Tools, Automation, Robotics and Technology (MATAR) 2012*. 2012.
31. Фаликман В.Р., Денискин В.В., Калашников О.О., Сорокин В.Ю. Отечественный опыт производства и применения самоуплотняющегося бетона: 2-3 (7) // *Национальная ассоциация ученых*. Россия, Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью «Логика+», 2015. № 2-3 (7). С. 68–73.
32. Каприелов С.С. и др. Модифицированные бетоны нового поколения в сооружениях ММДЦ «Москва-Сити» // *Строительные материалы*. 2006. № 10. С. 8–12.

33. Recent Advances in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICRAMERD 2021 / под ред. Pradhan P., Pattanayak B., Das H.C., Mahanta P. Singapore: Springer Nature, 2023.
34. Jackisch U.-V., Neumann M. Maschinengestelle für hochdynamische Produktionstechnik: Anforderungen, alternative Werkstoffe, Entwicklungs- und Fertigungsansätze, Anwendungen. Landsberg am Lech: Verl. moderne Industrie, 2014. 94 p.
35. Печенкин И.Г. Начала отечественной петрургии // Базальтовые технологии. 2013. № 2. С. 16–25.
36. Ateş E., Gerger M.N. Usability of Polymer Concrete as a Machine-Making Material Regarding Fatigue Strength: 3 // World Journal of Engineering and Technology. Scientific Research Publishing, 2013. Т. 1, № 3. Р. 59–64.
37. Бобрышев А.Н., Ерофеев В.Т., Козомазов В.Н. Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композитных систем. Санкт-Петербург: Наука, 2012. 474 с.
38. Соломатов В.И., Бобрышев А.Н., Прошин А.П. К теории метастабильных состояний в полимерных композитах с дисперсным наполнителем // Композиционные материалы и конструкции для сельского хозяйства. 1983. № 4. С. 91–102.
39. Mohammed H., Giuntini F., Sadique M., Shaw A., Bras A. Polymer modified concrete impact on the durability of infrastructure exposed to chloride environments // Construction and Building Materials. 2022. Т. 317. Р. 125771.
40. Lokuge W., Aravinthan T. Effect of fly ash on the behaviour of polymer concrete with different types of resin // Materials & Design. 2013. Т. 51. Р. 175–181.
41. McKeown P.A., Morgan G.H. Epoxy granite: a structural material for precision machines // Precision Engineering. 1979. Т. 1, № 4. Р. 227–229.
42. Пат. RU2110539C1 Российская Федерация, С1. Высоконаполненный композиционный материал – синтегран / Г.С. Санина, Н.Н. Кузьмин; № 95118601/04; заявл. 26.09.1995; опубл. 27.05.1998; Бюл. № 15
43. Кирилин Ю.В., Табаков В.П., Ерёмин Н.В. Методический подход к аналитическому моделированию несущей системы бесконсольного фрезерного станка: 1 (17) // Вестник Ульяновского государственного технического университета. Россия, Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2002. № 1 (17). С. 4–9.

44. Калашников В.И., Москвин Р.Н., Белякова Е.А. Применение бетона нового поколения в машиностроении // X Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». Екатеринбург, 2016. С. 173–174.
45. Браиловский М.И. Малодеформируемые элементы и детали машин из железобетона и специальных бетонов. Москва: Московский государственный открытый университет, 1997. 50 с.
46. Пат. 2820187 Российская Федерация, С1. Комбинированная железобетонная станна металлообрабатывающего станка / М.И. Браиловский, А.Г. Воскобойник, И.Е. Гольдштейн, А.М. Итин; патентообладатель Браиловский М.И. и др. – № 2007145873/22; заявл. 12.12.2007; опубл. 27.05.2008; Бюл. № 10.
47. UHPC ultra high performance concrete made of NANODUR® compound 5941 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dyckerhoff.com/>.
48. Dyckerhoff NANODUR® Compound 594 for simple production of UHPC [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dyckerhoff.com/documents>.
49. Довнар С.С., Якимович А.М., Ковалева И.Л., Шумский И.И. Гармонический анализ порталов тяжелых продольно-фрезерных станков типа «Гентри» с помощью МКЭ: 11 // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Республика Беларусь, Новополоцк: Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, 2014. № 11. С. 24–36.
50. Береговой В.А., Махамбетова К.Н., Лавров И.Ю. Опыт применения высокофункционального бетона в конструкции современного станка // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2023. № 5 (280). С. 31–37.
51. Kim H.S., Park K.Y. A study on the epoxy resin concrete for the ultra-precision machine tool bed // Journal of materials processing technology. Elsevier, 1995. Т. 48, № 1–4. P. 649–655.
52. Bruni C., Forcellese A., Gabrielli F., Simoncini M. Hard turning of an alloy steel on a machine tool with a polymer concrete bed // Journal of materials processing technology. Elsevier, 2008. Т. 202, № 1–3. P. 493–499.
53. Suh J.D., Lee D.G. Design and manufacture of hybrid polymer concrete bed for high-speed CNC milling machine // Int J Mech Mater Des. 2008. Т. 4, № 2. P. 113–121.
54. Rao S.S. Mechanical vibrations. 5th ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2011. 1084 p.

55. Теория и механизмы демпфирования в механике конструкций [Электронный ресурс] // COMSOL. URL: <https://www.comsol.ru/blogs/damping-in-structural-dynamics-theory-and-sources/> (дата обращения: 13.08.2023).
56. Мин К., Тарануха Н.А., Сысоев О.Е. Математическая модель определения коэффициента демпфирования для конструкционных материалов: 3 (60) // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2024. № 3 (60). С. 3–10.
57. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. М.: Издательство иностранной литературы, 1955. 192 с.
58. Cai C., Zheng H., Khan M., Hung C.K. Modeling of material damping properties in ANSYS // Users Conference and Exhibition - Pittsburgh ANSYS. 2002.
59. Лавров И.Ю. Разработка конструкции малогабаритного фрезерного станка со сборной железобетонной станиной // Сборник материалов XVIII Международной научно-технической конференции: Теория и практика повышения эффективности строительных материалов. Пенза: ПГУАС. 2023. С. 114–122.
60. Material damping and modal analysis [Электронный ресурс] // Ansys Learning Forum | Ansys Innovation Space. URL: <https://forum.ansys.com/forums/topic/material-damping-and-modal-analysis/> (дата обращения: 16.09.2023).
61. Chung I.S., Tsutsumi M., Ito Y. Dynamic characteristics of lathe using concrete bed // Bulletin of JSME. The Japan Society of Mechanical Engineers, 1985. Т. 28, № 239. P. 987–993.
62. Lin K. Non-destructive measurement for Young's modulus using a self-mixing laser diode. 2018.
63. Еленевский Д.С., Шапошников Ю.Н. Лазерно-компьютерная система получения и анализа спекл-интерферограмм вибрирующих объектов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 1999. Т. 1, № 1. С. 134–136.
64. Жужукин А.И., Соляников В.А. Особенности применения цифровой фотокамеры в оптической схеме спекл – интерферометра для виброметрии деталей газотурбинных двигателей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 4–1. С. 192–195.
65. Никитин А.В., Раменская В.Е., Бургардт Е.В., Филиппов Ю.А. Технология оценки качества станков: // Сибирский аэрокосмический журнал. 2005. № 3. С. 228–233.

66. Damping Effects [Электронный ресурс] // ANSYS Innovation Courses. URL: <https://courses.ansys.com/index.php/courses/damping-effects/> (дата обращения: 15.09.2023).
67. Береговой В.А., Лавров И.Ю. Высокофункциональные бетоны в станкостроении: технологические аспекты применения // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 4 (53). С. 18–25. DOI: 10.54734/20722958_2022_4_18
68. Тараканов О.В., Калашников В.И., Белякова Е.А., Москвин Р.Н. Самоуплотняющиеся бетоны нового поколения на основе местных сырьевых ресурсов // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 2. С. 47–53.
69. Строкова В.В., Жерновский И.В., Максаков А.В., Соловьева Л.Н., Огурцова Ю.Н. Экспресс-метод определения активности кремнеземного сырья для получения гранулированного наноструктурирующего заполнителя // Строительные материалы. 2013. № 1. С. 38–39.
70. Лавров И.Ю., Береговой В.А. Компенсация усадочных деформаций мелкозернистых бетонов для монолитных вибронагруженных конструкций // Цемент и его применение. 2024. № 3. С. 70–75.
71. Ушеров-Маршак А.В. Калориметрия цемента и бетона: Избранные труды. Харьков: Факт, 2002. 183 с.
72. Ушеров-Маршак А.В., Кабусь А.В., Исаенко Н.Н., Омельченко М.В., Слипушенко В.П. Состояние и перспективы использования калориметрии в технологии цемента и бетона. В кн. Калориметрия цемента и бетона. Харьков: Факт, 2002. 184 с.
73. Иванов И.М., Крамар Л.Я., Кирсанова А.А., Винсент Т. Влияние комплекса «микркремнезем-суперпластификатор» на формирование структуры и свойств цементного камня // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2018. Т. 18, № 1. С. 32–40.
74. Иванов И.М., Матвеев Д.В., Орлов А.А., Крамар Л.Я. Влияние водоцементного отношения и суперпластификаторов на процессы тепловыделения, гидратации и твердения цемента: 2 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. Т. 17, № 2. С. 42–49.
75. Мчедлов-Петросян О.П., Ушеров-Маршак А.В., Урженко А.М. Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов. Стройиздат, 1984. 225 с.

76. Bentz D. и др. Multi-scale investigation of the performance of limestone in concrete // Construction and Building Materials. 2014. Т. 75. Р. 1–22.
77. Береговой В.А., Лавров И.Ю. Использование полуадиабатической калориметрии для оценки влияния рецептурных факторов на кинетику тепловыделения цемента // Цемент и его применение. 2023. № 4. С. 62–67.
78. Ушеров-Маршак А.В., Кабусь А.В. Функциональная совместимость в системе «Цемент-добавка» и возможности ее количественной оценки // Инновации в бетоне-ведении, строительном производстве и подготовке инженерных кадров: сборник статей по материалам Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения И.Н. Ахвердова и С.С. Атаева, Минск, 9–10 июня 2016. С. 16–21.
79. Калашников В.И., Тараканов О.В., Кузнецов Ю.С., Володин В.М., Белякова Е.А. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей // Magazine of Civil Engineering. 2012. № 8 (34). С. 47–53.
80. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Финансы и статистика, 1981. 44 с.
81. Ansari M., Tartaglione F., Koenke C. Experimental validation of dynamic response of small-scale metaconcrete beams at resonance vibration: 14 // Materials. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. Т. 16, № 14. p. 5029.
82. Mitchell S.J., Pandolfi A., Ortiz M. Metaconcrete: designed aggregates to enhance dynamic performance // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2014. Т. 65. Р. 69–81.
83. Den Hartog J.P. Mechanical vibrations. Courier Corporation, 1985. 503 p.
84. Ansari M., Zacharias C., Koenke C. Metaconcrete: An Experimental Study on the Impact of the Core-Coating Inclusions on Mechanical Vibration // Materials (Basel). 2023. Т. 16, № 5. с. 1836.
85. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. Москва: Стройиздат, 1979. 344 с.
86. Кравченко И.В. Химия и технология специальных цементов. Москва: Стройиздат, 1979. 207 с.
87. Малинин Ю.С., Ватутина Л.С., Юдович Б.Э. Комплексные соли в процессах предгидратации цемента // НИИЦемент. 1980. С. 71–79.

88. Tennis P.D., Jennings H.M. A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes // *Cement and Concrete Research*. 2000. Т. 30, № 6. Р. 855–863.
89. Еленова А.А., Кривобородов Ю.Р. Влияние гидродинамически активированной добавки кристаллогидрата на гидратацию и твердение цементного камня // *Успехи в химии и химической технологии*. 2016. Т. 30, № 7 (176). С. 36–38.
90. Корчунов И.В., Торшин А.О., Курдюмова С.Е., Дмитриева Е.А. Влияние эффективных водоредуцирующих добавок на свойства цемента // *Сухие строительные смеси*. 2019. № 5. С. 30–34.
91. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. М.: Стройиздат, 1970. 271 с.
92. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К., Ламзин Д.А. Исследование механических свойств мелкозернистого бетона при динамическом нагружении // *Приволжский научный журнал*. 2014. № 4. С. 11–21.
93. Хвастунов В.Л., Хвастунов А.В., Махамбетова К.Н. Методика изучения сцепления фибры с дисперсно-армированным высокопрочным бетоном // *Актуальные проблемы науки и практики в различных отраслях народного хозяйства. Сборник докладов II национальной научно-практической конференции 28-29 марта 2019 г. Пенза: ПГУАС*. 2019. С. 110–114.
94. Пшеничный Г.Н. Несколько заметок о твердении и вибростойкости цементных бетонов // *Технологии бетонов*. 2013. № 9. С. 40–43.
95. Ansell A., Silfwerbrand J. The vibration resistance of young and early-age concrete // *Structural Concrete*. ICE Publishing, 2003. Т. 4, № 3. Р. 125–134.
96. Замчалин М.Н., Коровкин М.О., Ерошкина Н.А. Использование компьютера для обеспечения работы измерительной установки определения динамического модуля упругости бетона // *Современная техника и технологии*. 2014. № 12 [Электронный ресурс]. URL: <https://technology.snauka.ru/2014/12/5157> (дата обращения: 04.06.2025).
97. Колохов В.В., Колохов А.В. Некоторые аспекты измерения времени распространения ультразвуковых колебаний в бетоне: 3 (253-254) // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Украина, Днепропетровск: Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», 2019. № 3. С. 58–65.

98. Hamidian M., Shariati M., Arabnejad M.M.K., Sinaei H. Assessment of high strength and light weight aggregate concrete properties using ultrasonic pulse velocity technique // *Int. J. Phys. Sci.* 2011. T. 6, № 22. P. 5261–5266.
99. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов / Под ред. Ф. М. Диментберга и К. С. Колесникова. М.: Машиностроение, 1980. 544 с.
100. Тихомиров Ю.Ф. Промышленные вибрации и борьба с ними. Киев: Техника. 1975. 185 с.
101. Kaewunruen S., Li D., Chen Y., Xiang Z. Enhancement of dynamic damping in eco-friendly railway concrete sleepers using waste-tyre crumb rubber // *Materials*. 2018. T. 11. P. 1169–1189.
102. Troncosi M., Canella G., Vincenzi N. Identification of polymer concrete damping properties // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. IMECHE*, 2022. T. 236, № 21. P. 10657–10666.
103. Macioski G., de Oliveira V., Medeiros M. Strain, natural frequency, damping coefficient and elastic modulus of mortar beams determined by fiber Bragg grating (FBG) sensors // *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2021. T. 14. P. 1–17.
104. Feldman M. Non-linear system vibration analysis using Hilbert transform--I. Free vibration analysis method «Freevib» // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 1994. T. 8, № 2. P. 119–127.
105. Orak S. Investigation of vibration damping on polymer concrete with polyester resin // *Cement and Concrete Research*. 2000. T. 30, № 2. P. 171–174.
106. Abashin E.G. Determination of concrete class of rc beams by vibration-damping coefficient // *BR*. 2019. T. 84, № 4. P. 3–9.
107. Carrillo J., Alcocer S., González G. Experimental assessment of damping factors in concrete housing walls // *Ingeniería e Investigación*. 2012. T. 32. P. 42–46.
108. Nguyen Q.C., Ngo H.Q.T. Input shaping control to reduce residual vibration of a flexible beam // *Journal of Computer Science and Cybernetics*. 2016. T. 32. P. 75–90.
109. Wang B., Wang Z., Zuo X. Frequency Equation of Flexural Vibrating Cantilever Beam Considering the Rotary Inertial Moment of an Attached Mass // *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. T. 2017. P. 1–5.

110. Dunaj P., Powalka B., Berczyński S., Chodźko M., Okulik T. Increasing lathe machining stability by using a composite steel–polymer concrete frame // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020. T. 31. P. 1–13.
111. Carbajo J., Poveda P., Segovia E., Rincón E., Ramis J. Determination of dynamic elastic modulus of materials under a state of simple stresses by using electrodynamic actuators in beam-type mechanical elements // *Materials Letters*. 2022. T. 320. 132383.
112. Рекомендации по проектированию сборных и сборно-монолитных железобетонных фундаментов и опорных конструкций под блоки агрегатированного оборудования. Москва: НИИЖБ Госстроя СССР, 1981. 46 с.
113. Рекомендации по технологии изготовления и конструкций из высокопрочных бетонов. Москва: Госстрой СССР, 1987. 25 с.
114. Лавров И.Ю., Береговой В.А. Лабораторный комплекс для исследования вибродинамических показателей конструкционных бетонов // *Региональная архитектура и строительство*. 2023. № 4(57). С. 56–65. DOI: 10.54734/20722958_2023_4_56
115. Woigk W., Poloni E., Grossman M., Bouville F., Masania K., Studart A. Nacre-like composites with superior specific damping performance // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2022. T. 119. P. 1–7.
116. Калашников В.И. Что такое порошково-активированный бетон нового поколения // *Строительные материалы*. 2012. № 10. С. 70–71.
117. Калашников В.И. Терминология науки о бетоне нового поколения // *Строительные материалы*. 2011. № 3. С. 103–106.
118. Коровкин М.О., Лавров И.Ю., Ерошкина Н.А., Саденко С.М. Оценка структурной неоднородности бетона по геометрии поверхности разрушения образцов после определения их прочности при изгибе // *Материалы XIV Международной научно-технической конференции молодых ученых, посвященной памяти профессора В.И. Калашникова, Пенза 23–25 октября 2019*. Пенза: ПГУАС. 2019. С. 64–67.
119. Hanson J.A. Prestress Loss as Affected by Type of Curing // *PCI Journal*. 1964. T. 9, № 2. P. 69–93.
120. Long G., Yang J., Xie Y. The mechanical characteristics of steam-cured high strength concrete incorporating with lightweight aggregate // *Construction and Building Materials*. 2017. T. 136. P. 456–464.

121. Tian H., Hirsch T., Stephan D., Lehmann C. The Influence of Long-Term Autoclaving on the Properties of Ultra-High Performance Concrete // *Front. Mater. Frontiers*, 2022. Т. 9. DOI:10.3389/fmats.2022.844268
122. Schröfl C., Mechtcherine V., Gorges M. Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage // *Cement and Concrete Research*. 2012. Т. 42, № 6. P. 865–873.
123. Жарницкий В.Я., Корниенко П.А. Кинетика гидратации цемента, пластическая прочность бетона облицовки канала и ее термонапряженное состояние // *Природообустройство*. 2021. № 5. С. 85–90.
124. Шमितько Е.И., Макушина Ю.В., Белькова Н.А., Милохин И.В. Влажностная усадка бетона: влияние состава и структуры применяемых пластифицирующих добавок // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2020. № 1 (42). С. 128–135.
125. Макушина Ю.В., Шमितько Е.И., Белькова Н.А. Пути оптимизации качества цементных бетонов по показателю влажностной усадки // *Химия, физика и механика материалов*. 2020. № 4. С. 50–65.
126. Maltese C., Pistolesi C., Lolli A., Bravo A., Cerulli T., Salvioni D. Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars // *Cement and Concrete Research*. 2005. Т. 35, № 12. P. 2244–2251.
127. Oliveira M.J., Ribeiro A.B., Branco F.G. Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to control autogenous shrinkage in self-compacting concrete // *Construction and Building Materials*. Elsevier, 2014. Т. 52. P. 267–275.
128. Береговой В.А., Болдырев С.А., Лавров И.Ю. Цифровые технологии в исследовании механических свойств тонкослойных материалов // *Региональная архитектура и строительство*. 2020. № 4 (45). С. 5–11.
129. Береговой В.А., Махамбетова К.Н., Лавров И.Ю., Востоков Ф.А. Перспективы импортозамещения сырьевых компонентов высококачественного дисперсно-армированного бетона и исследование его физико-механических свойств // *Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование*. 2023. № 1(16). С. 16–21.
130. Демьянова В.С., Перминов Б.Г., Белянская Н.М. Проектирование предприятий сборного железобетона. М.: Издательство АСВ, 2001. 384 с.

Акты внедрения



420095, Республика Татарстан, г. Казань, Тер.
Химград, д. 73, помещ. 21
89179001257
info@tatpromstan.ru
ИНН/КПП: 1655216482/165801001.
БИК: 049205603
ОТДЕЛЕНИЕ "БАНК ТАТАРСТАН" №8610
ПАО СБЕРБАНК Р/С: 40702810662000016413

исх. № 260/25 от 18.06.2025

АКТ

опытно-производственного апробирования испытательной **установки** для исследования вибродинамических показателей конструкционных бетонов

Мы, нижеподписавшиеся, директор ООО «ТАТПРОМСТАН» Нуриев И.М., зав. кафедрой «ТСМиД» (ПГУАС), д-р техн. наук, профессор Береговой В.А. и аспирант ПГУАС Лавров И.Ю., составили настоящий акт о том, что нами было произведено опытно-производственное апробирование испытательной установки для исследования динамических характеристик высокофункциональных конструкционных бетонов при вибрационном воздействии.

Внедрение, наряду с конструктивными и аппаратными решениями (испытательный стенд, измерительная система) испытательного оборудования, дополнительно включало разработку метода исследования вибродинамических характеристик (величина демпфирования, динамический модуль упругости) конструкционных бетонов.

Лабораторная установка характеризуется следующими показателями

- предельная длина испытываемых образцов, мм – 400;
- предельная ширина испытываемых образцов, мм – 70;
- диапазон измерения собственной частоты колебаний образца, Гц – 80...10000;

Оборудование применялось для определения вибродинамических показателей образцов конструкционных материалов и оценки эффективности конкурирующих вариантов рецептурно-технологических решений.

Эффективность внедрения

Применение отечественных комплектующих в составе лабораторного оборудования позволило снизить его себестоимость на 30–50 % по сравнению с зарубежными аналогами, например, на основе лазерной или акселерометрической системы измерения, и решить задачу в области импортозамещения в части оборудования для экспресс-оценки вибродинамических характеристик современных высокофункциональных бетонов.

Директор ООО «ТАТПРОМСТАН»

Зав. кафедрой «ТСМиД» ПГУАС
д-р техн. наук, проф.

Аспирант ПГУАС



И.М. Нуриев

В.А. Береговой

И.Ю. Лавров





МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬСТВА»
440028, Пенза, ул. Германа Титова, 28.
Тел./факс: (8412) 49-72-77
E-mail: office@pguas.ru
WEB: www.pguas.ru
ОКПО 02069059
ОГРН 1025801202624
ИНН/КПП 5835000786/583501001

№ _____

На № _____ от _____

Утверждаю
Ректор ФГБОУ ВО

«Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства»

С.А. Болдырев
21.05.2025



АКТ

опытно-производственного апробирования испытательной установки для определения деформативных показателей строительных материалов

Мы, нижеподписавшиеся, проректор по учебной работе ПГУАС, канд. техн. наук, доцент Р.В. Тарасов, начальник научно-исследовательского сектора ПГУАС, канд. техн. наук, доцент Е.Н. Тамбовцев, зав. кафедрой «ТСМиД» (ПГУАС), д-р техн. наук, профессор В.А. Береговой и ассистент кафедры «ТСМиД» (ПГУАС) И.Ю. Лавров, составили настоящий акт о том, что на кафедре «Технология строительных материалов и деревообработки» было проведено опытно-производственное апробирование разработанной испытательной установки (стенда) для определения деформативных характеристик строительных материалов в соответствии с рекомендациями ГОСТ 24544-2020.

Установка применяется в учебном процессе для проведения лабораторных работ и в научно-исследовательской деятельности университета для изучения модуля упругости, деформаций ползучести и усадки бетонов, цементного камня, древесины и композитных материалов. Апробированный стенд состоит из шести независимых установок, позволяющих проводить долговременные исследования деформаций в условиях постоянной нагрузки.

Станины установок изготовлены из высокопрочного самоуплотняющегося бетона методом литья, что является технически и экономически рациональным решением.

Принцип работы основан на методе четырёхточечного изгиба образцов-балочек с регистрацией величины прогиба под заданной нагрузкой.

Оборудование используется в учебном процессе и научных исследованиях аспирантов и студентов университета. Оборудование применяется для оценки эффективности рецептурно-технологических решений при разработке новых составов строительных материалов.

Проректор по учебной работе

ПГУАС, канд. техн. наук, доцент

Р.В. Тарасов

Начальник научно-исследовательского сектора

ПГУАС, канд. техн. наук, доцент

Е.Н. Тамбовцев

Зав. кафедрой «ТСМиД» ПГУАС,

д-р техн. наук, профессор

В.А. Береговой

Аспирант ПГУАС

И.Ю. Лавров



Подпись: Тарасов Р.В., Тамбовцев Е.Н.
Зав. кафедрой
Береговой В.А., Лавров И.Ю.
Нач. кадров
И.Ю. Лавров

