

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I»

На правах рукописи

Шварц Филипп Михайлович

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ  
ДОБАВКИ ДЛЯ САМОУПЛОТНЯЮЩЕЙСЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Соловьёва В.Я.

Санкт-Петербург – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ПОСТАНОВКА РАБОТЫ. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	11
1.1 Особенности создания самоуплотняющейся бетонной смеси и бетона на ее основе.....	11
1.2 Материалы, применяемые для изготовления самоуплотняющейся бетонной смеси.....	16
1.3 Тонкодисперсные минеральные наполнители, поверхностно-активные вещества и наномодификаторы самоуплотняющихся бетонов.....	17
1.4 Постановка работы.....	27
1.5 Методы и методики исследований. Статистическая обработка...	29
1.6 Выводы.....	36
2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПОВ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОПОДВИЖНОЙ БЕТОННОЙ СМЕСИ.....	37
2.1 Разработка суперпластифицирующей, стабилизирующей и повышающей прочность химической добавки.....	38
2.2 Определение основных сырьевых компонентов для создания эффективного самоуплотняющегося бетона.....	47
2.3 Выводы.....	50
3 ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАЗРАБОТАННОГО САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА И ОБРАЗУЮЩИЕСЯ ГИДРАТНЫЕ ФАЗЫ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО БЕТОНА.....	51
3.1 Определение марок по подвижности «РК» и текучести «Т» самоуплотняющейся бетонной смеси.....	51
3.2 Определение основных физических свойств бетона.....	53
3.3 Определение фазовых изменений, происходящих при твердении бетона.....	59
3.4 Выводы.....	66
4 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ БЕТОННОЙ СМЕСИ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ РАЗРАБОТАННОЙ ДОБАВКОЙ, И ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА ЕЕ ОСНОВЕ.....	67
4.1 Описание модели линейной множественной регрессии и ее исследование.....	68

4.2	Использование генеративно-состязательной нейросети для построения регрессионной модели.....	78
4.3	Выводы.....	84
5	ИЗГОТОВЛЕНИЕ САМОУПЛОТНЯЮЩЕЙСЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	86
5.1	Определение реологических характеристик СУБС и физико-механических характеристик бетона на ее основе.....	86
5.2	Технологическая схема производства комплексной химической добавки и ее изготовление для самоуплотняющейся бетонной смеси в присутствии тонкодисперсных наполнителей.....	88
5.3	Выводы.....	90
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	91
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	94
	Приложение А Пример генерации данных для кластера № 13.....	115
	Приложение Б Акт опытно-промышленных испытаний.....	120
	Приложение В Стандарт организации на комплексную химическую добавку	123

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Строительство объектов различного назначения совершенствуется, и при этом требуется бетон высокого качества для строительства таких объектов, как атомные электростанции, гидросооружения, мостовые сооружения. Например, для уменьшения или полного исключения возникновения стыковочных швов между элементами конструкции эффективно использовать самоуплотняющуюся бетонную смесь.

Применение бетонной смеси повышенной подвижности предъявляет особые требования к ее качеству: бетонная смесь должна быть связной (отличаться пониженными показателями раствороотделения) и обеспечивать высокие физико-механические показатели бетона на ее основе. Самоуплотняющаяся бетонная смесь рекомендуется для конструкций с повышенной плотностью армирования, при бетонировании в условиях повышенной стесненности и сложных опалубочных формах. Этот результат может быть достигнут разработкой состава комплексной химической добавки на основе модификаторов эффективного реакционного действия, обеспечивающей выполнение требований к бетонам нового поколения.

Решению данной актуальной задачи посвящена настоящая диссертационная работа.

**Степень разработанности темы исследования.** Выполнение данной работы является продолжением научных исследований, проводимых отечественными и зарубежными учеными по направлению создания самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов повышенных эксплуатационных характеристик на их основе, которые представлены в работах Ю.М. Баженова, Г.В. Несветаева, В.И. Калашникова, С.С. Каприелова, Е.М. Чернышева, О.В. Артамоновой, Л.Б. Сватовской, В.Я. Соловьевой, А.В. Шейнфельда, Н. Okamura, К. Ozawa, М. Ouchi, P.C. Aïtcin, H.J.H. Brouwers, M. Collepardi и др., а также в трудах научно-исследовательских и проектных институтов.

**Цель работы** – разработать комплексную химическую добавку для создания самоуплотняющейся бетонной смеси повышенной связности и бетона с улучшенными эксплуатационными характеристиками на ее основе.

**Задачи исследования:**

1. Определить компоненты добавки, совместное действие которых оказывает суперпластифицирующее и стабилизирующее действие на самоуплотняющуюся бетонную смесь и способствует формированию улучшенных эксплуатационных показателей бетона.

2. Произвести оценку изменения удобоукладываемости и раствороотделения бетонной смеси в присутствии разработанной комплексной химической добавки при дополнительном использовании тонкодисперсных наполнителей различного происхождения и определить изменение эксплуатационных показателей бетона.

3. Исследовать продукты гидратации, образующиеся при твердении бетона с разработанной комплексной химической добавкой.

4. Выполнить математический анализ экспериментальных данных научных исследований для подтверждения влияния компонентов разработанной добавки на анализируемый набор характеристик бетонной смеси и бетона.

5. Разработать технологический регламент и стандарт организации производства комплексной химической добавки; осуществить опытно-промышленный выпуск комплексной химической добавки, самоуплотняющейся бетонной смеси и бетона с ее использованием в условиях промышленного предприятия.

**Объект исследования** – самоуплотняющаяся бетонная смесь с разработанной комплексной химической добавкой и бетон на ее основе.

**Предмет исследования** – оценка удобоукладываемости и связности самоуплотняющейся бетонной смеси, эксплуатационных показателей бетона (водонепроницаемость, прочность, морозостойкость) с использованием комплексной химической добавки.

**Научная новизна исследования:**

1. Установлено, что поликарбоксилатные полимеры разной структуры, нанодисперсии диоксида кремния и азотосодержащие углеводородные полимеры обладают хорошей совместимостью, обеспечивая суперпластифицирующее, стабилизирующее и повышенное реакционно-активное действие, обеспечивая получение бетонной смеси повышенной удобоукладываемости и связности.

2. Показано, что поликарбоксилатные полимеры разной структуры (в присутствии портландцемента как катализатора) проявляют реакционную активность, которая сопровождается образованием более сложных полимерных цепей, наличие которых подтверждается ИК-спектроскопическими исследованиями: образованием или усилением полос поглощения в диапазоне измерений волнового числа  $1310 \text{ см}^{-1}$  -  $1240 \text{ см}^{-1}$ .

3. Впервые установлено, что использование комплексной химической добавки обеспечивает формирование связи с катионами тонкодисперсных наполнителей, что подтверждается результатами ИК-спектроскопических исследований: наличием полосы поглощения в диапазоне измерения волнового числа  $560 \text{ см}^{-1}$ , соответствующей образованию контакта между атомом азота аминогруппы азотсодержащего углеводорода и катионом  $\text{Ca}^{2+}$  тонкодисперсного известняка, и полосы поглощения в диапазоне  $600 \text{ см}^{-1}$  – для катиона  $\text{Fe}^{2+}$  тонкодисперсного доменного гранулированного шлака.

4. Определено, что рост прочности на растяжение при изгибе обеспечивается образованием новых фаз: обнаружено небольшое количество гидросиликатов кальция  $3\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  и  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; при введении в бетонную смесь тонкодисперсного известняка дополнительно обнаружен гидрокарбонат кальция  $2\text{CaCO}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ; при введении тонкодисперсного доменного шлака дополнительно обнаружен гидросиликат магния  $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .

**Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Показано, что разработанная комплексная химическая добавка совместно с тонкодисперсными наполнителями улучшает реологические свойства бетонной смеси и обеспечивает достижение марки по удобоукладываемости РК2 (расплав

конуса 66 - 75 см) при пониженной величине раствороотделения, равной 7,5%, относительно требований ГОСТ Р 59714 (не более 17,5%).

2. Определено, что бетон на основе самоуплотняющейся бетонной смеси в присутствии разработанной комплексной химической добавки и тонкодисперсных наполнителей, представленных природным известняком или гранулированным доменным шлаком, характеризуется относительно контрольного состава бетона В35 В<sub>тб</sub>4,0 F<sub>2</sub>200 W8 повышенными показателями прочности: рост прочности на сжатие составляет 72 - 74% до значения 75 - 76 МПа; повышение прочности на растяжение при изгибе составляет 85 - 87% до значения 9,6 - 9,7 МПа, обеспечивая отношение предела прочности на растяжение при изгибе ( $R_{изг}$ ) к пределу прочности на сжатие ( $R_{сж}$ ), равном 0,125, что косвенно указывает на повышенную устойчивость бетона к трещинообразованию; призмная прочность составляет 102 - 105% относительно контрольного состава и составляет 83% от кубиковой прочности на сжатие, дополнительно подтверждая повышенную устойчивость бетона к трещинообразованию. Деформация усадки бетона составляет 0,3 - 0,4 мм/м, морозостойкость увеличивается в 2 раза до марки F<sub>2</sub>400, водонепроницаемость повышается до марки W14.

3. Получены регрессионные зависимости, подтверждающие эффективность действия выбранных компонентов созданной комплексной химической добавки на исследуемый комплекс свойств самоуплотняющейся бетонной смеси и бетона на ее основе. Показана возможность использования генеративно-состязательных нейросетей для оценки рациональности состава комплексной химической добавки.

4. Произведен опытно-промышленный выпуск новой комплексной химической добавки, а также самоуплотняющейся бетонной смеси марки по удобоукладываемости РК2 общим объемом 9 м<sup>3</sup>. Характеристики прочности на сжатие показали высокую однородность бетона, подтверждаемую коэффициентом вариации  $V_m = 5,7\%$ . Показатели разработанной бетонной смеси и бетона опытно-промышленного изготовления хорошо коррелируют с результатами проведенных исследований, что явилось основанием для разработки стандарта организации на комплексную химическую добавку. Бетоны, полученные на основе

самоуплотняющейся бетонной смеси с применением разработанной комплексной химической добавки, относятся к высокопрочным и могут быть рекомендованы к широкому применению в транспортном строительстве, мостостроении и при возведении высотных объектов.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой данного диссертационного исследования являются положения теории создания самоуплотняющихся бетонных смесей, обладающих повышенной связностью, и теории твердения самоуплотняющихся бетонов в присутствии химических добавок разной природы. Для подтверждения полученных характеристик бетона проводились рентгенофазовые, ИК-спектроскопические, дифференциально-термические исследования продуктов, образующихся в процессе твердения бетона.

Использованы методы математического моделирования, анализа и статистики, что позволило обеспечить надежность и достоверность выводов, а также выявить закономерности и зависимости в исследуемых данных. Данные научно-экспериментальных и опытно-промышленных исследований подвергались статистической обработке в соответствии с требованиями нормативной документации.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия: п. 2, п. 5, п. 9.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Обоснование выбора компонентов комплексной химической добавки и самоуплотняющейся бетонной смеси.
2. Реологические свойства разработанной самоуплотняющейся бетонной смеси и эксплуатационные характеристики бетона на ее основе.
3. Результаты физико-химических исследований образующихся гидратных фаз в процессе твердения бетона с использованием разработанной комплексной химической добавки, и их влияние на эксплуатационные характеристики бетона.
4. Математические зависимости влияния компонентов разработанной комплексной химической добавки на показатели качества бетонной смеси и бетона.

5. Результаты апробации разработанной комплексной химической добавки и самоуплотняющейся бетонной смеси с ее использованием в условиях промышленного производства; сравнение физико-механических показателей самоуплотняющейся бетонной смеси опытно-промышленного изготовления с разработанной комплексной химической добавкой и бетона на ее основе с данными и научно-экспериментальных исследований.

**Достоверность результатов** подтверждается большим объемом научно-экспериментальных исследований и высокой сходимостью результатов. Для оценки показателей качества самоуплотняющейся бетонной смеси и бетона на ее основе использованы стандартные методики и поверенное оборудование.

**Апробация результатов исследований** проводилась на VII Международной научно-практической интернет-конференции «Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии» (Санкт-Петербург, 2020), V Бетанкуровском Международном инженерном форуме (Санкт-Петербург, 2023), конференции по изобретательству и рационализаторской деятельности Октябрьской железной дороги (Санкт-Петербург, 2023); результаты исследования докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры «Инженерная химия и естествознание» ФГБОУ ВО ПГУПС в 2022 - 2024 годах.

**Внедрение результатов.** Выпущена опытно-промышленная партия самоуплотняющейся бетонной смеси марки по удобоукладываемости РК2 объемом 9м<sup>3</sup> повышенной связности, модифицированной разработанной комплексной химической добавкой. Результаты проведенных испытаний выпущенной продукции демонстрируют высокую степень сходимости с результатами научно-экспериментальных исследований.

**Личный вклад автора** заключается в экспериментальном и теоретическом подтверждении рациональности применения поликарбоксилатных полимеров разной структуры с целью проявления их совместной реакционной активности в присутствии цемента как катализатора при дополнительном использовании нанодисперсий гидроксида кремния, представленных в виде золя кремниевой кислоты, а также азотосодержащими углеводородными полимерами; создании

математической модели зависимости свойств самоуплотняющейся бетонной смеси и бетона от компонентов комплексной химической добавки с использованием множественной линейной регрессии и генеративно-состязательной нейросети для расширения статистической значимости экспериментальных значений.

**Публикации.** Основные положения диссертации достаточно полно изложены в 13 печатных работах, в их числе 7 научных работ в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 4 патента на изобретение, из них 2 патента РФ и 2 Евразийских патента.

**Структура и объем диссертации.**

Диссертация изложена на 114 страницах основного текста, состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка литературы, включающего 184 источника. В работе представлено 35 рисунков, 30 таблиц и 3 приложения.

# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ПОСТАНОВКА РАБОТЫ. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 1.1 Особенности создания самоуплотняющейся бетонной смеси и бетона на ее основе

Ведущим направлением развития экономики страны, по праву, является строительная отрасль, а одним из основных строительных материалов с давних пор был и остается бетон. Мировая тенденция применения данного материала ведет к разработке высокоэффективных специализированных сложных составов для обеспечения максимально возможной технологичности строительных и производственных операций, применению высокопрочных бетонов с повышенной долговечностью и конструкционной надежностью.

В конце прошлого века, с появлением новых суперпластифицирующих добавок на основе поликарбосилата и полиакрилата, в Японии был создан бетон, который способен уплотняться под действием собственного веса, не требующий дополнительного механического воздействия и отличался высокими показателями по расплыву смеси, свыше 550 мм, который получил название самоуплотняющегося (СУБ). Основная цель, стоявшая перед новым материалом – предотвращение технологических дефектов в строительных конструкциях вследствие недостаточного уплотнения бетона при заливке и вибрировании, для сведения к минимуму ошибок под влиянием человеческого фактора при данных операциях. Благодаря применению высокоэффективных суперпластификаторов, удалось совместить высокую подвижность смеси и малое содержание воды [40]. Отличительной особенностью смеси, из которой его изготавливают, является способность самостоятельно растекаться, сохраняя при этом связность, без появления эффектов водоотделения и раствооротделения. Благодаря своей повышенной подвижности и связности, смесь способна без дополнительного вибрирования заполнять опалубочные формы, что особенно важно, когда необходимо густое армирование, что показано в работах Brouwers Н.Ј.Н, Паникина Д.А., Коротких Д.Н. [61, 86, 87, 89].

Использование бетонной смеси с подобными свойствами не только облегчает операции бетонирования в труднодоступных местах, но и позволяет снизить трудоемкость ввиду отсутствия необходимости в проведении операции вибрировании [33, 72]. Сфера применения чрезвычайно широка: от высотного строительства [62] до использования при прокладке тоннелей метро [20], возможно применение для возведения защитных сооружений атомных электростанций [85] и многие другие. Ряд исследований и практический опыт применения свидетельствует об эффективности применения данного класса бетона для производства сборных железобетонных конструкций, реставрационных работ, использовании в стесненных условиях, что достаточно подробно исследовано в работах Окамуры Х., Каприелова С. С., Батракова В. Г., Шейнфельда А. В., Рояка, Г. С. Грановской И. В., [91-96]. Самоуплотняющиеся бетоны используются при возведении мостов, дорожном строительстве, при строительстве нефтеналивных платформ, резервуаров [62, 64, 67]. При строительстве Нижегородского метро был применен самоуплотняющийся бетон. Опыт показал снижение трудозатрат на вибрирование бетонной смеси, которые снижаются в 5-6 раз, скорость укладки возрастает при использовании самоуплотняющегося бетона до 2-3 раз, данные значения приводятся работе А.В. Гинзбурга [20].

После изобретения в Японии, в середине 80-х годов прошлого века, данный материал постепенно стали использовать по всему миру. К 2005 году в Европе к нему были сформулированы основные требования, которые представлены в европейских нормах [97]. Несколько лет спустя, в Российской Федерации также разрабатывается и принимается государственный стандарт, который регламентирует основные свойства, качественные параметры и стандарты испытаний при производстве и приемке самоуплотняющихся бетонных смесей [94, 99].

Основные свойства самоуплотняющихся бетонных смесей согласно разработанным международным стандартам качества и отечественному ГОСТ Р 59714:

- увеличенная удобоукладываемость по параметру расплыва конуса. Представлено три класса, которые измеряются при помощи испытаний на расплыв конуса с градациями от 55 до 65 см, следующая ступень от 66 до 75 см и наибольшая марка расплыва конуса от 76 до 85 см;

- связность (расслаиваемость) бетонной смеси по параметру раствороотделения, ограничивается в зависимости от марки по расплыву;

- вязкость смеси, которая определяется в зависимости от временного показателя достижения диаметра в 500 мм при испытании на расплыв конуса. Вязкость также может быть определена путем измерения времени истечения смеси из воронки, которая представлена на рисунке 1.1;

Данные показатели не являются взаимозаменяемыми и указываются в зависимости от требований заказчика.

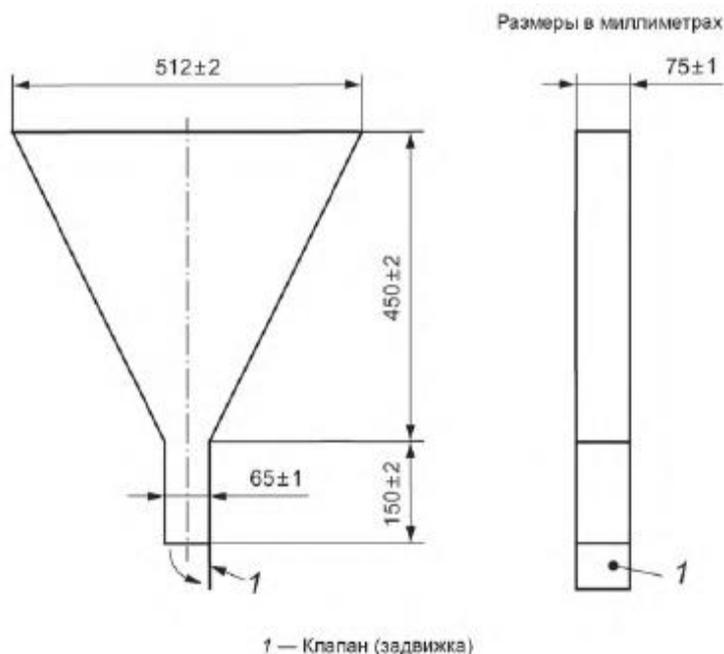


Рисунок 1.1 – Схематическое изображение воронки, применяемой для определения вязкости самоуплотняющейся бетонной смеси

- текучесть (в западных источниках используется термин «проникающая способность») смеси, которая определяется по способности смеси протекать через препятствия в виде арматурных стержней в специальном коробе (рисунок 1.2) или через кольцо со вставками имитирующие арматурные стержни (рисунок 1.3).

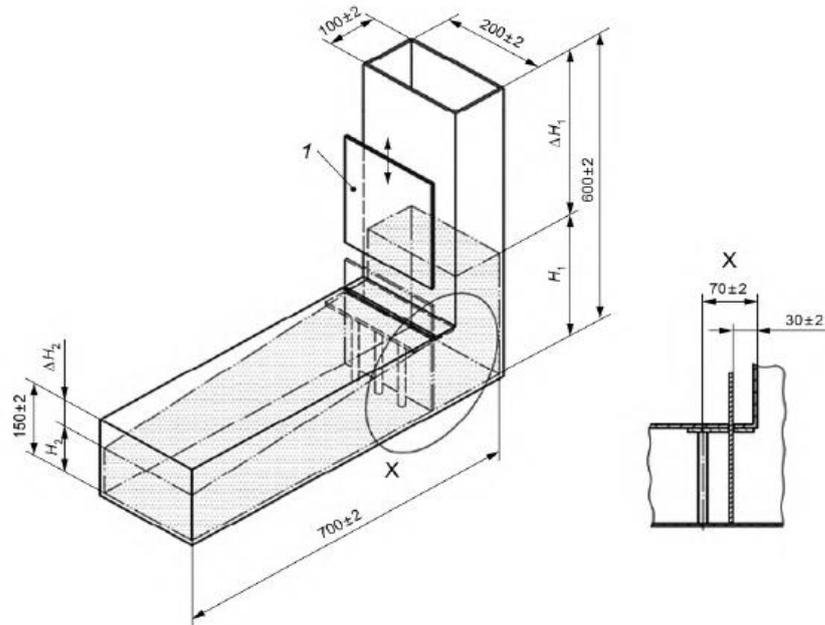


Рисунок 1.2 – Схема короба для определения текучести (проникающей способности) СУБ

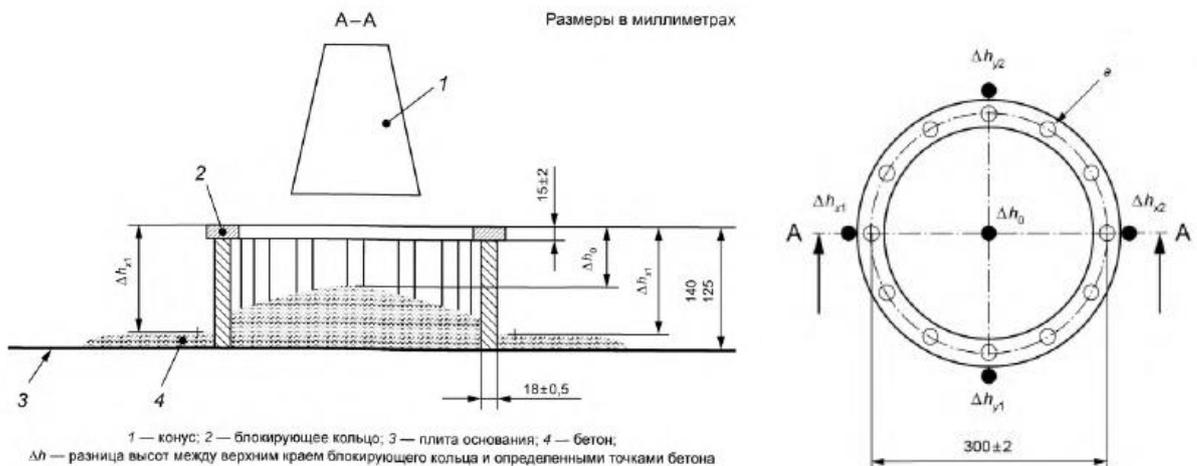


Рисунок 1.3 – Схема блокировочного кольца для определения текучести (проникающей способности) СУБ

Согласно разработанным корпорацией Росатом в 2015 году требованиям [100], по работе с самоуплотняющимися бетонными смесями (СУБС), в зависимости от показателей качества, рекомендованы разные варианты использования смеси, представленные в таблице 1.1. Аналогичные рекомендации приведены в Методических указаниях Росавтодора по использованию СУБС [101].

Таблица 1.1 – Рекомендованные области применения самоуплотняющейся бетонной смеси в зависимости от показателей качества

Обозначение	Назначение и области применения самоуплотняющихся бетонов
<i>В зависимости от подвижности бетонной смеси</i>	
PK1 от 550 до 650 мм	Неармированные или малоармированные бетонные конструкции: плиты перекрытий, облицовки туннелей, фундаментов, сваи
PK2 от 660 до 750 мм	Опоры, ростверки, балки пролетных строений, большинство обычных сооружений - колонны, стены
PK3 от 760 до 850 мм	Подпорные стенки, заполнение замкнутых форм, вертикальные элементы, густоармированные конструкции сложных форм, торкретирование, конструкции с высокими требованиями к качеству поверхности. Рекомендуется к применению СУБ с размером зерна заполнителя до 20 мм
<i>В зависимости от вязкости бетонной смеси</i>	
V1, V3 (вязкость измеряемая по истечению из воронки менее 9 секунд)	Густоармированные конструкции и изделия, к которым предъявляются высокие требования по качеству поверхности
V2/V4 (вязкость по измеряемая по истечению из воронки от 9 до 25 секунд)	Конструкции и изделия с невысокими требованиями к качеству поверхности. Смесь имеет хорошую устойчивость к расслаиванию
<i>В зависимости от текучести бетонной смеси</i>	
Марка по текучести T1, T3	Вертикальные сооружения, домостроение, конструкции, армированные с шагом от 80 до 100 мм
Марка по текучести T2, T4	Инженерные сооружения, армированные с шагом от 60 до 80 мм, обделки горных выработок
<i>По устойчивости к расслоению</i>	
Расслаиваемость не более 20%	Высотные элементы, за исключением тонких балок, вертикальные сооружения, армированные с шагом до 80 мм. Максимальное расстояние растекания смеси менее 5 метров.

Продолжение таблицы 1.1

Обозначение	Назначение и области применения самоуплотняющихся бетонов
Расслаиваемость не более 15%	Стены и тонкостенные профили, армированные с шагом свыше 80 мм. Максимальное расстояние растекания смеси более 5 метров.

## 1.2 Материалы, применяемые для изготовления самоуплотняющейся бетонной смеси

В качестве одного из основных компонентов СУБС являются пластификаторы, их предпочтительно использовать на основе поликарбоксилатных полимеров, как наиболее эффективные, а также необходимо дополнительно использовать тонкодисперсный компонент для снижения расслаиваемости бетонной смеси при повышенном распыле конуса.

ГОСТ Р 59714-2021 регламентирует правила по соотношению компонентов самоуплотняющихся бетонных смесей тяжелых бетонов:

- расход цемента должен находиться в диапазоне от 300 до 500 кг/м<sup>3</sup>;
- общее количество тонкодисперсных компонентов в составе бетона, включающих цемент, минеральные добавки (активные и инертные микрозаполнители) или органоминеральные модификаторы, должно находиться в диапазоне от 550 до 600 кг/м<sup>3</sup>. Количество тонкодисперсных компонентов может быть меньше вышеприведенных значений при использовании химических добавок - стабилизаторов;
- общий объем теста из тонкодисперсных компонентов (цемент + добавки + вода) в составе бетонной смеси должен составлять от 0,35 до 0,40 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;
- соотношение объемов мелкого и крупного заполнителей должно находиться в диапазоне от 45:55 до 50:50 объемных %. Соответственно доля песка в смеси заполнителей должна быть в диапазоне от 0,45 до 0,50;

- при использовании крупного заполнителя фракции до 20 мм соотношение фракций 5-10 мм и 10-20 мм должно находиться в диапазоне от 55:45 до 65:35 массовых %.

Для уменьшения расхода цемента, с учетом необходимости достижения наилучшей подвижности, следует принимать во внимание максимальную плотность упаковки заполнителей, обращая внимание на гранулометрический состав смеси. Применение данного принципа при разработке состава, согласно исследованиям, позволяет получать наилучшие результаты по расплыву и отсутствию расслоения состава, что показано в работах Добшица Л.М., Кардумяна Г.С., Несветаева Г.В., Калашникова В. И., и других [14, 48, 102, 104, 105-108].

Дополнительное использование в составе смеси СУБ компонентов, представленных природными тонкодисперсными составляющими: микрокремнеземом, метакаолином, известняком, наполнителями техногенного происхождения, такими как зола уноса или доменный шлак, позволяет не только понижать количество используемого портландцемента но и способствует снижению таких параметров, как водоотделение и расслоение что показывают работы Баженова Ю.М, Пустовгара А.П. Калашникова В. И, и другие [13, 18, 35-39, 41, 42, 53, 109, 110-113]. Зарубежные исследования также показывают, что присутствие в составе самоуплотняющихся бетонных смесей частиц, размером менее 90 мкм, не менее 500 – 600 кг на куб смеси стабилизируют состав, препятствуя расслоению [114-116].

### **1.3 Тонкодисперсные минеральные наполнители, поверхностно-активные вещества и наномодификаторы самоуплотняющихся бетонов**

Для самоуплотняющихся бетонных смесей применяют в наибольшей степени пластификаторы на поликарбоксилатной основе. Их использование позволяет понижать водоцементное отношение до 40% благодаря пространственному строению собственных молекул что отмечено в работах Вовка А.И., Добшица Л.М., Тарасова В.Н., Короткова Н.П., Гусева Б. В., и др. [17, 24, 58, 117-119],

образуя стерический эффект диспергации образующихся цементных флокул [58, 120-122]. Молекула схематически изображена на рисунке 1.4. Электростатическое отталкивание возникает благодаря адсорбции карбоксильных групп на поверхности цемента, что приводит к образованию отрицательного заряда. Боковые неионные гидрофобные группы не адсорбируются, создавая эффект стерического отталкивания. Схема приведена на рисунке 1.5. Данные эффекты складываются друг с другом, что усиливает общий пластифицирующий эффект, как показано у Вовка А.И., Калашникова В. И., Ушерова-Маршака А. В., Фаликмана В. Р. и др. [123-127].

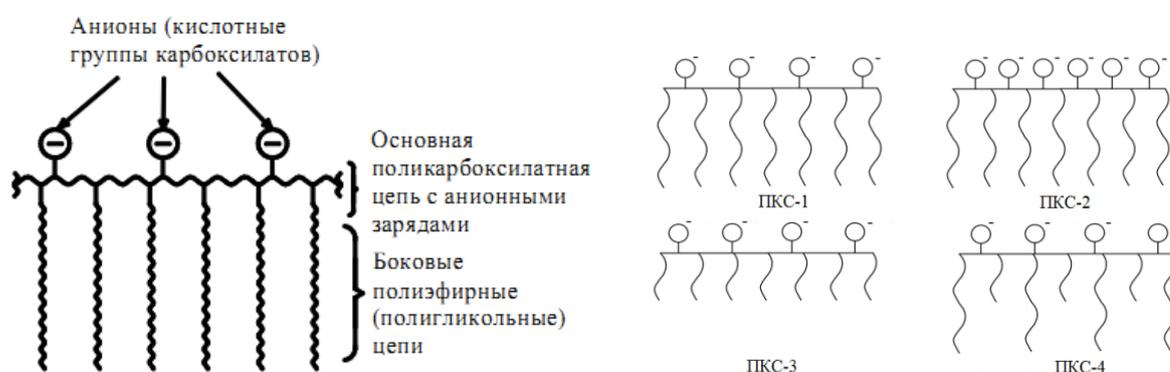


Рисунок 1.4 – Схема молекулы поликарбоксилатного полимера

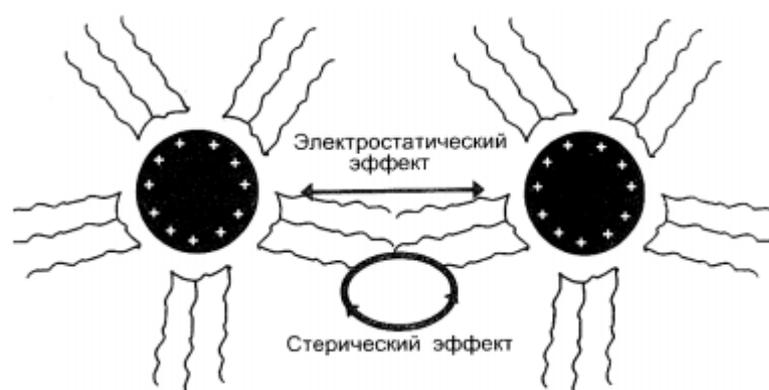


Рисунок 1.5 – Схема механизма действия поликарбоксилатного пластификатора

Эффективность действия поликарбоксилатных полимеров зависит от длины боковых цепей молекулы, их количества, а также ее химической основы. За счет изменения данных показателей возможно получение пластификаторов с различным эффектом действия, в том числе понижение зависимости действия от

минералогического состава цементного клинкера и тонкодисперсных наполнителей [76, 128-130]. Замечено, что суперпластификаторы на основе поликарбоксилатных полимеров проявляют разное действие, в зависимости от минерального состава цементного клинкера Вовка А.И., Фаликмана В. Р. Holmberg L., Hansson M., Engstrand J., Koizumi K. , Umemura Y., Schmidt W., Brouwers H. J. H., Kühne H. C., Meng B. [17, 75, 126, 131-134].

Положительно заряженные поверхности частиц цемента адсорбируют молекулы пластификатора, при этом показано, что преимущественно в данном взаимодействии участвуют трехкальциевый алюминат  $C_3A$  и четырехкальциевый алюмоферрит  $C_4AF$ . Данные минералы обладают положительным дзета-потенциалом который, в свою очередь, определяется разностью потенциалов между дисперсионной средой и жидкостным слоем, который неподвижно окружает частицу. Отрицательный начальный дзета-потенциал фазы C-S-H меняет знак, по мере накопления ионов кальция  $Ca^{2+}$  с положительным зарядом. Положительным дзета-потенциалом также обладают гидратные фазы, в наибольшей степени этtringит, которые принимают участие во взаимодействии с поликарбоксилатным пластификатором. Обладающий отрицательным дзета-потенциалом портландит не участвует в адсорбции пластификатора, следовательно, от количества трехкальциевого алюмината  $C_3A$  зависит степень подвижности цементной смеси, что показано у Вовка, А. И., Изотова В. С., Тараканова О. В., Brouwers H. J. H., Plank J., Hirsch C. [123, 135-138].

Обнаружено влияние сульфатов на эффективность действия поликарбоксилатных пластификаторов. Конкуренция сульфатов конкурируют за адсорбцию молекул поликарбоксилатного пластификатора снижает их диспергирующую активность в цементной системе [119, 139]. Это показано на примере сульфатов щелочей калия  $K_2SO_4$  и натрия  $Na_2SO_4$ .

Также на действие поликарбоксилатных пластификаторов влияют глинистые примеси заполнителей. Выявлено, что их наличие может снижать эффективность их действия из-за встраивания молекул полимера в слои глины. Монтмориллонит

способен снижать активность поликарбоксилатного пластификатора в наибольшей степени [47, 65, 140].

Позитивную роль в подвижности бетонной смеси при использовании поликарбоксилатных пластификаторов может играть добавка микрокремнезема, поскольку его поверхностный заряд на цементном растворе, меняет знак на положительный. По данному механизму действия, частицы микрокремнезема с положительным зарядом адсорбируют поликарбоксилатные молекулы, а поскольку удельная площадь поверхности частиц микрокремнезема на порядок превосходит частицы цемента, эффект диспергирования увеличивается [141-143]. Согласно данным исследованиям, на диспергирование микрокремнезема в наибольшей степени действуют поликарбоксилатные полимеры на основе аллиловых эфиров, в то время как на цемент действует более обширный набор поликарбоксилатных полимеров. На основе полученных данных можно говорить о целесообразности применения комбинации поликарбоксилатных полимеров различной структуры, с учетом разнонаправленного действия, учитывая обязательное применение минеральных тонкодисперсных добавок.

Использование минеральных наполнителей, таких как микрокремнезем, доменный шлак, молотый известняк, зола-уноса, в составе бетонных смесей используется уже давно, значимым эффектом их применения является возможность сокращения цементного расхода, а также возможность придания бетонной смеси и бетону дополнительных свойств [124, 140, 144, 147]. Таким образом можно добиться понижения используемого количества клинкерного цемента, увеличить показатели плотности, добиться увеличения прочностных качеств, увеличить долговечность бетона и его стойкость к агрессивным воздействиям окружающей среды различного генеза.

Благодаря применению минеральных наполнителей формируются низкоосновные гидросиликаты, уменьшается количество  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Происходят положительные сдвиги в изменении количества и соотношения при формировании гелевых микропор и капилляров. Фиксируется активизация реакции гидратации на ранних стадиях, температурная регуляция при затвердевании смеси, снижение

риска негативного взаимодействия заполнителя со щелочью - данные эффекты, наблюдающиеся при использовании тонкодисперсных минеральных добавок природного и техногенного происхождения, изучены и показаны в приведенных исследованиях.

При добавлении в бетонную смесь тонкодисперсные минеральные наполнители положительно влияют на такие свойства смеси, как расслоение, водоотделение, что описано в работах А. В. Ушерова-Маршака, А. И. Вовка, В. И. Калашникова, Б. В. Гусева и других [148-154]. Согласно концепции Баженова Ю.М. Чернышова Е.М., Коротких Д.Н., основное структурное воздействие наполнителей – создание более плотной твердеющей бетонной системы [155].

По гранулометрическому составу минеральные добавки классифицируют на разбавители, когда размер частиц добавки сравним с размером частиц цемента, таких как молотый доменный металлургический шлак, зола-уноса и добавки, обладающие удельной площадью поверхности на порядок выше частиц цемента – микрокремнезем, метакраин, которые оказывают уплотняющее действие [156]. Помимо этого, существует деление на добавки природного происхождения, такие как тонкомолотый известняк или техногенного – микрокремнезем, доменный шлак.

Применение активных минеральных добавок с пуццоланическими свойствами, согласно ГОСТ Р 56592-2015 п. 5, а также ГОСТ Р 56593-2015 п.14 [157, 158], способствует образованию низкоосновных гидросиликатов кальция типа CSH(I) с отношением  $\text{CaO/SiO}_2 < 1$ , обладающих прочной удлиненной волокнистой структурой, вместо первичных гидросиликатов типа портландита. Наличие низкоосновных гидросиликатов, в образующемся бетонном камне, способствует формированию более плотной структуры камня и увеличению прочностных характеристик на сжатие и изгиб, что показано в работах Ольгинского А.Г и Каприелова С.С. [159, 160]. Показано [161], что электроннодонорные центры добавок в начале процесса гидратации связываются с электронноакцепторными частицами портландита и гидроалюминатных фаз, задерживая их рост. Таким образом, благодаря

адсорбции продуктов гидролиза, а также замедлению пересыщения жидкой фазы происходит активизация процессов гидратации [162].

Исследования указывают на уникальное действие при использовании ультрадисперсного микрокремнезема. Диоксид кремния  $\text{SiO}_2$  является его основной составляющей и оказывает воздействие при формировании структуры бетона на наноразмерном и микроразмерном уровнях, что показано в работах [163, 164].

Благодаря своей развитой удельной поверхности, порядка 12000 – 13000 м<sup>2</sup>/кг, частицы микрокремнезема обладают высокой энергетической активностью, что способствует повышению прочностных показателей бетона, а благодаря размерам частиц, которые в десятки раз меньше частиц портландцемента, они заполняют пустоты между зернами портландцемента, что способствует формированию более плотной структуры камня при его пониженной пористости. За счет формирования центров кристаллизации, увеличения гидратационной активности, формируются низкоосновные гидросиликаты при уменьшении присутствия портландита.

Одновременно с этим данная добавка характеризуется повышенной водопотребностью и водоудерживающей способностью. Проникая между частицами цемента, микрокремнезем способствует увеличению подвижности и связности смеси [90, 165].

Отмечается эффективность использования сочетания нескольких минеральных добавок, к примеру, микрокремнезема, золы-уноса и доменного шлака для улучшения качества самоуплотняющегося бетона [166], в работах Ермиловой Е.Ю., Камаловой З.А., Халюшева А.К., Прудникова В.В., Зайченко Н.М., [167-169] исследовалась эффективность комбинации добавления минеральных добавок (зола-уноса, микрокремнезем, молотый доменный шлак, молотый известняк и пр.). В целом исследователи отмечают улучшение прочностных характеристик бетона и реологических свойств смеси при возрастающей сложности проектирования состава [170, 171].

*Применение наномодификаторов цементных систем.*

В современном представлении о технологии бетона развиваются концепции о структуре бетона и связанных с ней свойствах, как о многокомпонентных материалах, где представлены в качестве элементов структуры образующиеся гидратные фазы, размер частиц которых составляет от 1 до 100 нм, непосредственно зерна цемента, а также дополнительные элементы в виде добавок химического происхождения, добавок минерального типа, различного рода наполнители, а также грубодисперсные заполнители миллиметрового и сантиметрового размеров [11]. В результате формирования структур нитевидного типа, дополнительного формирования контактов между частицами различных фаз, а также благодаря минимизации размеров структурных элементов происходит улучшение бетона.

Уменьшение размеров структурных элементов, образование непрерывных нитевидных структур, формирующихся в результате трехмерных контактов между частицами разных фаз способствует улучшению их функциональных свойств.

Наночастицы  $\text{SiO}_2$ , которые имеют площадь удельной поверхности порядка 180000  $\text{м}^2/\text{кг}$ , относят к одним из многообещающих наноразмерных модификаторов, применяемых в цементных системах, которые повышают прочность и долговечность. Воздействие частиц наноразмера со столь развитой удельной поверхностью способствует уплотнению структуры цементного камня и уменьшению пористости, также есть данные о возможности контроля реакции образования и трансформации гидросиликатов кальция (C-S-H), которые отвечают за долговечность и ряд эксплуатационных характеристик, таких как ползучесть и усадка. К этому же разряду относят и наноразмерные элементы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также алюмосиликаты. Благодаря их присутствию в бетонной системе оказывается возможным увеличение такого показателя, как модуль упругости, осуществление снижения бетонной усадки. Дополнительно данные частицы способствуют понижению инфильтрации хлоридов [49]. Авторы отмечают, что

многие тонкодисперсные минеральные наполнители могут иметь в своем составе заметное количество наноразмерных частиц.

Исследованиям воздействия наночастиц на цементную систему посвящены работы ученых Чернышова Е.М., Артамоновой О.В., Коротких Д.Н., Низиной Т.А., Сватовской Л.Б., Соловьевой В.Я.

Можно выделить ряд основных технологических аспектов работы с присутствием наноразмерных элементов в бетоне, которые выделяют авторы работы [5]:

- необходимая эффективизация сочетания наполнителей определенной дисперсности, начиная с наноуровня;
- использование наполнителей активного типа начиная с наноуровневой размерности;
- изменение и улучшение структуры границ между фазами;
- внедрение наноразмерных частиц для создания целенаправленной кристаллизации образующегося цементного камня;
- наноуровневое армирование структуры цементного камня за счет введения наночастиц и образования нитевидных структур;
- модификация пластификаторов дополнительным введением наночастиц, тем самым изменение свойств подвижности смеси и управление эффектом водоредуцирования.

Одним из вариантов модификации структуры и получения бетона с улучшенными характеристиками является применение углеродных нанотрубок, представляющих собой полые цилиндрические однослойные или многослойные образования диаметром 0,4-100 нм. Данный вариант рассматривается в статье [51]. Исследование показало, что применение модифицированных нанотрубок в комплексе с широко известным суперпластификатором С-3 позволило повысить прочность бетона по сравнению с контрольным составом на третьи сутки на величину 20%, а в проектном возрасте двадцать восемь суток увеличение прочности по сравнению с контрольным составом составило 40%.

Подобные результаты были также получены в работе [66]. Согласно проведенного исследования было показано образование структурной матрицы, состоящей из кристаллогидратных вновь образованных соединений на поверхности твердой фазы после дополнительного введения диспергированных нанотрубок углеродного происхождения, что способствует созданию вязущей матрицы повышенной прочности.

Изучение полученного бетона при помощи сканирующего электронного микроскопа, а также с помощью микроанализа в инфракрасном спектре продемонстрировали построение плотной оболочки из образованных гидратов, располагающейся на поверхности твердой фазы при использовании нанокремнезема в сочетании с дополнительным присутствием диспергированных углеродных нанотрубок. Ключевыми причинами данного явления авторы называют дополнительное присутствие использованных нанозаполнителей.

Исследование, описанное в статье [52], посвящено возможности модификации бетона при использовании наноразмерных частиц, представленных углеродными нанотрубками, в том числе самоуплотняющегося бетона. Авторы используют пластифицирующую добавку, состоящую из наноуглеродного материала и суперпластификатора. В качестве сухой добавки были использованы микрокремнезем и сульфоалюминатная добавка. Показано, что данная добавка увеличивает прочность на сжатие самоуплотняющегося бетона в раннем возрасте на 41%.

Исследование [59] указывает на влияние наномодификатора комплексного действия, в основе которого лежит применение углеродных нанотрубок, на кинетику гидратации цемента, фазовый состав и прочностные характеристики цементного камня; показывает, что при добавлении наномодификатора процесс гидратации происходит быстрее, что приводит к образованию оптимальной микроструктуры. С помощью использования методов сканирующей электронной микроскопии было установлено, что формируется дополнительная направленная кристаллизация частиц новообразований цементного камня с образованием

контактов срастания. Рентгенофазовый анализ демонстрирует изменения в фазовом составе образцов, модифицированных наномодификатором.

Согласно [34] обозначаются контуры требований к наномодификаторам структуры бетона, одним из важных аспектов которых является способ введения самих частиц в раствор, обозначаются два возможных варианта модифицирования бетона наноразмерными частицами:

- введение предварительно синтезированных частиц в смесь;
- выращивание в системе твердеющей цементной матрицы наночастиц, которые необходимы для соответствующей модификации.

Исследователи отмечают, что при использовании варианта предварительного синтеза с целью последующего введения наночастиц необходимо получить стабильную суспензию с водой. Указанный метод технологически довольно сложен, однако в работе подчеркивается целесообразность синтеза частиц нужного размера с использованием технологии образования золь-геля, получаемого в виде водно-солевой суспензии. В следующей работе [4] находят дополнительное развитие основные принципы, которые были сформулированы выше. Убедительно показывается возможность и преимущество метода синтеза наночастиц в системе вода – диоксид кремния по золь-гель технологии.

Доказывается, что в присутствии данного модификатора процесс гидратации цементного камня протекает быстрее, а образующаяся структура отличается от системы без модификаторов увеличением фаз  $(\text{CaO})_x \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  и уменьшением  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ . Данные были получены в ходе рентгенодифрактометрического исследования процесса твердения. Развитие данного подхода описывается в работе [4].

Авторами уделяется повышенное внимание модификаторам, которые преобразуют структуру бетона с использованием водного раствора диоксида кремния. Ввиду того, добавки, синтез которых показан в исследовании, обладают кристаллохимической природой, которая является подобной гидросиликатам кальция, данные модификаторы обладают возможностью для встраивания в

структуру затвердевающего бетона в качестве центров кристаллизации гидросиликатных фаз.

Авторы предлагают эволюционную модель образования частиц в системе  $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  на наномасштабном уровне, которая находит подтверждение в ходе проведенных экспериментов.

Также в работе [11] показано участие наночастиц диоксида кремния в пуццолановых реакциях, которые приводят к уменьшению количества образующегося гидроксида кальция, а также к образованию повышенного количества гидросиликатов кальция C-S-H. В работе делается вывод, что наночастицы способствуют улучшению контактов в заполнителе, тем самым обеспечивая повышение прочности на растяжение при изгибе, что, в свою очередь, является фактором, положительно влияющим на трещиностойкость бетона.

#### **1.4 Постановка работы**

В работах А.И. Вовка, Ю.Г. Барабанщикова, Л.И. Касторных и других исследователей указана важная роль суперпластификаторов (СП) для создания СУБ, в том числе СП последнего поколения, на основе поликарбоксилатных полимеров, использование которых значительно повышает подвижность бетонных смесей, но при этом необходимо отметить, что недостаточное внимание уделяется связности высокоподвижных систем.

Исследования, проводимые на кафедре «Инженерная химия и естествознание» Санкт-Петербургского университета путей сообщения под руководством д.т.н. Сватовской Л.Б. и д.т.н. Соловьевой В.Я. за последнее десятилетие способствовали разработке теоретической концепции, нашедшие экспериментальное подтверждение, описывающие способность некоторых поликарбоксилатных полимеров, например, на основе ангидрида малеиновой кислоты, проявлять реакционную активность в присутствии портландцемента, в качестве катализатора. Совместное применение поликарбоксилатных полимеров разной природы увеличивает эффект пластификации, при этом, если один из

используемых полимеров обладает реакционной активностью в присутствии портландцемента, то происходит химическое взаимодействие с другим полимером, обеспечивая образование общих разветвленных цепей, повышая связность высокоподвижной смеси.

Нельзя не отметить важную роль тонкодисперсных наполнителей разного происхождения, которые дополнительно обеспечивают бетонной смеси увеличение подвижности и способствуют повышению ее связности, при этом оказывая положительное воздействие на свойства получаемого бетона. При этом рационально обеспечивать условия, при которых возможно дополнительное образование контактов с компонентами бетонной смеси. С этой целью целесообразно использовать в качестве дополнительного компонента добавки азотосодержащий углеводород, т.к., в результате особого строения атома азота, обладающего собственной электронной парой, он способен к формированию контактов с компонентами бетонной смеси, в наибольшей степени с тонкодисперсными наполнителями, повышая связность бетонной смеси, формируя при этом прочную структуру бетона.

Значимая часть исследований по улучшению качества бетона указывает на эффективность применения наноразмерных структурных элементов. Отмечается значимая роль по способствованию формированию более прочной и плотной структуры бетона, при этом мало освещено влияние нанодисперсий на связность подвижных бетонных смесей.

В этой связи, с учетом ранее проведенных исследований и полученных патентов, можно сделать предположение, что избыток энергии, характерный для нанодисперсий, за счет обладания сформированной поверхностью, а также их повышенная подвижность и реакционная активность будет способствовать образованию увеличенного числа новых гидратных фаз в процессе синтеза, оказывая положительное воздействие не только на повышение прочности на сжатие бетона а также на повышение прочности на растяжение при изгибе, но и на связность самоуплотняющейся бетонной смеси.

Таким образом, для оказания эффекта суперпластификации на бетонную смесь, добиваясь при этом эффекта стабилизации (получения высокоподвижной бетонной смеси высокой связности), обосновано рассмотрение использования сочетания поликарбоксилатных полимеров разной природы, использования нанодисперсий диоксида кремния в качестве компонента добавки, представленного в виде золя кремниевой кислоты, а также применение азотосодержащего углеводородного полимера способно произвести указанное комплексное воздействие на бетонную смесь, оказывающее влияние на формирование бетона плотной структуры повышенной прочности, в том числе добиваясь увеличения прочности на растяжение при изгибе, при высоких показателях водонепроницаемости и морозостойкости.

Для рационального подбора компонентов бетонной смеси необходимо принимать во внимание их электронное строение с целью увеличения возможного образования, в процессе твердения, труднорастворимых, высокопрочных новых комплексных гидратных фаз, что и оказывает влияние на формирование улучшенных физико-механических показателей.

### 1.5 Методы и методики исследований. Статистическая обработка

При проведении анализа и исследования физико-механических параметров применяемых исходных материалов, а также для изучения свойств бетонных смесей и бетонов с добавками, опирались на применяемые стандарты и нормы, приведенные в таблице 1.2. Все испытания проводились в современном оборудовании, прошедшем соответствующие поверки.

Таблица 1.2 – Нормативные документы, применяемые в исследовании

Материал, показатель	Нормативный документ
<i>Цемент</i>	
Вид, наименование	ГОСТ 31108-2020 Цементы общестроительные. Технические условия ГОСТ 30515-2013 Цементы. Общие технические условия

Продолжение таблицы 1.2

Материал, показатель	Нормативный документ
Физико-механические характеристики цемента	ГОСТ 30744-2001 Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка
<u>Песок</u>	
Песок для испытания цемента. Технические требования к песку	ГОСТ 6139-2020 Песок для испытаний цемента. Технические условия
Песок для самоуплотняющейся бетонной смеси.	ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ. Технические условия
Физико-механические характеристики песка для самоуплотняющейся бетонной смеси.	ГОСТ 8735-88 Песок для строительных работ. Методы испытаний
<u>Щебень</u>	
Щебень для самоуплотняющейся бетонной смеси	ГОСТ 8269.0-97 Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний
Физико-механические характеристики щебня для самоуплотняющегося бетона	ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород. Технические условия
<u>Добавки</u>	
Добавки для самоуплотняющейся бетонной смеси	ГОСТ 24211-2008 Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия
<u>Смеси бетонные</u>	
Бетонная смесь	ГОСТ 59714-2021 смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия
Подвижность (марка по расплыву конуса)	ГОСТ Р 59715-2022 Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний
Вязкость	
Расслаиваемость (раствороотделение, водоотделение)	

Продолжение таблицы 1.2

Материал, показатель	Нормативный документ
<i>Бетон</i>	
Разновидность	ГОСТ 26633-2015 Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия
Прочность на сжатие (кубиковая), на растяжение при изгибе	ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам
Призменная прочность	ГОСТ 24452-2023 Бетоны. Методы определения призменной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона
Усадка	ГОСТ 24544-2020 Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести
Водопоглощение	ГОСТ 12730.3-2020 Бетоны. Метод определения водопоглощения
Водонепроницаемость	ГОСТ 12730.5-2018 Бетоны. Методы определения водонепроницаемости
Плотность	ГОСТ ГОСТ 12730.1-2020 Бетоны. Методы определения плотности
Морозостойкость	10060-2012 Бетоны. Методы определения морозостойкости
<i>Вода</i>	
Вода для самоуплотняющейся бетонной смеси	ГОСТ 23732-2011 Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия

Пропорции компонентов создаваемой бетонной смеси принимались в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 59714-2021.

По показателям прочности на сжатие ( $R_{сж}$ ) и прочности на растяжение при изгибе ( $R_{изг}$ ) определяли коэффициент устойчивости бетона к трещинообразованию отношения  $R_{изг}/R_{сж}$ , согласно методике приложения Л ГОСТ 10180, как косвенно свидетельствующий о свойстве трещиностойкости бетона.

На поверенном лабораторном прессе ТП-1-1500Ис проводили эксперименты по определению различных видов прочности бетона (прочность на сжатие (кубиковая прочность), прочность на растяжение при изгибе, призменная

прочность). С этой целью были изготовлены образцы бетона со следующими размерами: 40x40x160 мм, 100x100x100 мм и 100x100x400 мм.

Для определения величины водонепроницаемости полученного бетона были изготовлены образцы в форме цилиндра, с геометрическими размерами: высотой – 15 см, диаметр – 15 см. При измерении показателей водонепроницаемости по методу «мокрого пятна» использовался испытательный стенд УФФ-6/09.

Измерения показателей морозостойкости осуществляли по методике ГОСТ 10060-2012, используя третий метод, в климатической камере.

Основные параметры подвижности бетонных смесей определялись по методикам ГОСТ Р 59715-2022 по расплыву конуса Абрамса, вязкость измеряли по параметру  $t_{500}$ , измеряя время достижения расплыва смеси диаметра в 500 мм, текучесть смеси Т4 определяли по методу блокирующего кольца при использовании 16 стержней.

Для объяснения достигнутых повышенных прочностных показателей качества и эксплуатационных характеристик бетона проводили физико-химические исследования продуктов, образующихся при твердении бетона.

Для подтверждения реакционной активности поликарбоксилатного полимера и образование новых связей при использовании азотсодержащего углеводородного полимера в сочетании с тонкодисперсными наполнителями определенного происхождения проводили ИК-спектроскопические исследования при помощи ИК-спектрографа «Shimadzu», модель IRSpirit.

Рентгенофазовый анализ проводился на рентгеновском дифрактометре ЭКРОС XRD-9500. Идентификация осуществлялась при помощи соответствующих стандартных данных дифрактометрии, обнаруживаемой в используемой базе данных стандартного типа для образцов. Проводился сравнительный анализ стандартного вещества с линиями, полученными на используемом образце.

Для дополнительного подтверждения полученных данных осуществляли дифференциально-термический анализ на установке Термоскан-2. Тепловые эффекты были получены в режиме воздушной атмосферы без изменения давления.

Получали кривую ДТА в температурном диапазоне, начиная от 20 °С при средней скорости изменения температуры порядка 10 градусов за 60 секунд, до достижения 1000 °С.

*Статистическая обработка данных.*

Определяли прочностные показатели партии бетона в количестве тридцати серий образцов кубов с длиной ребра 100 мм, изготовленных последовательно. Количество образцов в каждой серии – шесть штук.

Для определения значения прочности использовали формулу:

$$R = \alpha \frac{F}{A}, \quad (1.1)$$

где  $F$  – разрушающая нагрузка, Н;

$A$  – площадь рабочего сечения образца, мм<sup>2</sup>;

$\alpha = 0,95$  – коэффициент пересчета значений прочности для образцов с базовым размером.

Для гарантии точности измерений показатели прочности бетона фиксировались с высокой степенью точности, равной 0,1 МПа, что позволяет обеспечить надежность и достоверность полученных данных.

Для вычисления значений фактической прочности партии бетона применяли формулу, приведенную ниже:

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}, \quad (1.2)$$

где  $R_i$  – единичное значение прочности бетона, МПа;

$n$  – общее число единичных значений прочности бетона.

Для определения среднеквадратического отклонения показателей прочности бетона в партии  $S_m$  (МПа), выполнялся расчет по формуле, приведенной ниже:

$$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - R_m)^2}{n - 1}}, \quad (1.3)$$

где  $R_i$  – единичное значение прочности бетона, МПа;

$R_m$  – фактическая прочность бетона в партии, МПа;

$n$  – общее число единичных значений прочности бетона в партии.

Текущий коэффициент вариации прочности бетона в партии определяется по формуле:

$$V_m = \frac{S_m}{R_m} \cdot 100, \quad (1.4)$$

Коэффициент вариации прочности бетона  $\bar{V}_m$ , %, определяли по формуле:

$$\bar{V}_m = \frac{\sum_{i=1}^n V_{mi} - n_i}{\sum_{i=1}^n n_i}, \quad (1.5)$$

где  $V_{mi}$  – коэффициент вариации бетона в каждой  $i$  – партии;

$n_i$  – число единичных значений прочности бетона в каждой  $i$  – партии;

$\sum_{i=1}^n n_i$  – общее число единичных значений прочности бетона за анализируемый период.

Данная методика использовалась согласно указаниям ГОСТ 18105.

Высокоподвижная бетонная смесь должна не только достигать расплыва конуса соответствующего значения при испытаниях, но также и обладать необходимыми свойствами связности и текучести при заполнении опалубочных форм, чтобы удовлетворять критериям самоуплотняемости. С этой целью требуется проводить регламентируемые ГОСТ Р 59714 испытания на соответствие выработанным критериям.

Согласно ГОСТ Р 59714, самоуплотняющиеся бетонные смеси подразделяются на марки по удобоукладываемости в зависимости от величины расплыва стандартного конуса Абрамса (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Марка удобоукладываемости в зависимости от расплыва конуса

Марка по удобоукладываемости	Расплав нормального конуса, см
РК1	55—65
РК2	66—75
РК3	76—85

Для испытания смеси на подвижность используется метод, аналогичный испытанию на осадку конуса, согласно ГОСТ 10181-2014. При этом, согласно

ГОСТ Р 59715 конус необходимо заполнять бетонной смесью без какого-либо уплотнения, после снятия конуса смесь также расплывается без какого-либо механического воздействия. Величину расплыва конуса измеряют как сумму величин наибольшего расплыва в перпендикулярных направлениях, разделенную на два, при этом следует учитывать, что разница измеренных величин не должна быть более 5 см при марке по удобоукладываемости смеси РК1, не более 4 см – при марке РК2, и не более 3 см – при марке РК3, в противном случае эксперимент следует повторить.

Требования к показателю раслаиваемости самоуплотняющихся бетонных смесей подразделяют в зависимости от достигаемой величины расплыва стандартного конуса Абрамса (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Нормирование раслаиваемости самоуплотняющейся бетонной смеси в зависимости от марки по расплыву конуса

Марка по удобоукладываемости	Раслаиваемость самоуплотняющейся бетонной смеси, %, не более
РК1	15,0
РК2	17,5
РК3	20,0

Параметр раслаиваемости смеси определяется измерением величины раствооротделения. Согласно методике, регламентируемой стандартом испытаний ГОСТ Р 79715, необходимо измерить отношение массы смеси, которая прошла сквозь сито с размером ячейки 5 мм, к смеси, не прошедшей сквозь сито. Для данного испытания используется определенный объем изготовленной бетонной смеси.

Вязкости самоуплотняющейся бетонной смеси согласно ГОСТ 59714 измеряли отрезком времени, за которое расплыв нормального конуса достигает значения 500 мм или временем истечения бетонной смеси из V-образной воронки. Допустимые показатели вязкости приведены в таблице 1.5.

Самоуплотняющаяся бетонная смесь используется для особо ответственных объектов, поэтому, помимо сочетания высокой подвижности и связности смеси,

необходимо обеспечить повышенную надежность бетону, формирующемуся на ее основе, в период эксплуатации за счет повышения прочностных характеристик, а также устойчивость к агрессивным воздействиям окружающей среды за счет увеличения показателей водонепроницаемости, морозостойкости, что способствует увеличению продолжительности срока службы бетона.

Таблица 1.5 – Определение марки вязкости самоуплотняющейся бетонной смеси

Марка по вязкости	Время, за которое расплыв нормального конуса достигнет величины 50 см, с	Время истечения из V-образной воронки, с
V1	Менее 2	-
V2	2 и более	-
V3	-	Менее 9
V4	-	9-25

## 1.6 Выводы

Самоуплотняющиеся бетонные смеси технологически удобны для применения в широком спектре строительных объектов. Многие аспекты создания смеси глубоко изучены, например, использование тонкодисперсных наполнителей или суперпластификаторов на основе поликарбоксилатных полимеров. Высокоактуальными остаются вопросы обеспечения связности высокоподвижной смеси и получения высокопрочного бетона на ее основе. Перспективным направлением, наряду с суперпластификаторами, является использование наномодификаторов в цементных системах, для повышения связности и интенсификации процессов кристаллизации бетона. Для достижения высоких параметров удобоукладываемости и связности бетонной смеси, а также для повышения прочностных свойств бетона, целесообразно сочетать действие поверхностно-активных веществ (ПАВ) и энергетически активных наночастиц при использовании различных тонкодисперсных наполнителей.

## 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПОВ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОПОДВИЖНОЙ БЕТОННОЙ СМЕСИ

Экспериментальные исследования проводили с использованием состава бетона класса В35, начальная характеристика подвижности бетонной смеси П5 (осадка конуса более 20 см).

Состав смеси:

- портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108-2020, нормально схватывающийся, состав минералов приведен в таблице 2.1, показатели прочности цемента приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.1 – Минералогический состав используемого клинкера

Минералогический состав	Содержание, %
Трёхкальциевый силикат ( $C_3S$ )	62,05
Двухкальциевый силикат ( $C_2S$ )	11,3
Трёхкальциевый алюминат ( $C_3A$ )	6,64
Четырёхкальциевый алюмоферрит ( $C_4AF$ )	11,88

Таблица 2.2 – Показатели цемента

Наименование показателя	Единица измерения	Значение
Прочность на сжатие (2 суток)	МПа	33,7
Прочность на сжатие (28 суток)	МПа	50,3
Нормальная плотность	%	26,14
Сроки схватывания: – начало, не ранее – конец, не позднее	мин	167 266
Удельная поверхность	м <sup>2</sup> /кг	422

- использовали песок для строительных работ с модулем крупности 2,1 (ГОСТ 8736-2014) со следующим содержанием вредных примесей: содержание пылевидных и глинистых частиц – 0,92%; глины в комках нет;

-применяли щебень гранитный, фракции 5-10 мм (ГОСТ 8267-93), фракцию выбирали согласно методическим рекомендациям ГОСТ 59714;

- для затворения бетонных смесей использовали воду по ГОСТ 23732-2011.

Для изготовления контрольного состава бетона марки В35 П5, использовали следующий расход материалов: портландцемент 460 кг; песок 800 кг; щебень 790 кг; водоцементное отношение (В/Ц) принято равным 0,58.

Подбор состава бетона производился с учетом требований относительно СУБС, указанных в ГОСТ Р 59714 2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия».

## **2.1 Разработка суперпластифицирующей, стабилизирующей и повышающей прочность химической добавки**

Для создания инновационной комплексной химической добавки, целесообразно, в качестве одного из компонентов, использовать поверхностно-активное вещество, обладающие повышенным пластифицирующим действием, а именно, поликарбоксилатные полимеры. Представляется эффективным использовать поликарбоксилатные полимеры разной химической структуры, где в один из компонентов представлен реакционно-активным поликарбоксилатным полимером на основе ангидрида малеиновой кислоты.

Ниже в таблице 2.3 представлены компоненты для изготовления добавки и обоснование выбора каждого компонента.

В работе использовался золь с плотностью раствора  $\rho = 1,023 \text{ г/см}^3$  и водородным показателем  $\text{pH} = 4,0 \pm 0,5$ , размер частиц диоксида кремния, входящих в состав золя  $\text{SiO}_2$ , составляет 60-70 нм по данным испытательной лаборатории ООО «Аналит Продактс»; для этого использовался лазерный анализатор размера частиц SALD-2300 (Shimadzu) для коллоидного раствора кремниевой кислоты с  $\text{pH} = 4,0 \pm 0,5$ .

Таблица 2.3 – Компоненты комплексной химической добавкой с обоснованием выбора

Наименование компонента	Обоснование выбора
Водный раствор поликарбоксилатного полимера этилового эфира метакриловой кислоты $\rho = 1,027 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 6,0 \pm 0,5$	полимер с высокой пластифицирующей способностью
Водный раствор поликарбоксилатного полимера ангидрида малеиновой кислоты $\rho = 1,029 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 6,0 \pm 0,5$	полимер обладает пластифицирующей способностью и реакционной активностью в присутствии ПЦ, как катализатора
Водный раствор золя кремниевой кислоты $\rho = 1,023 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 4,0 \pm 0,5$ ; содержащий нанодисперсии гидроксида кремния $\text{SiO}_2$	компонент повышенной реакционной активности, оказывает положительное влияние на связность бетонной смеси и на повышение показателей прочности
Азотосодержащий углеводород, представленный пропилендиамином с $\rho = 1,005 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 9,0 \pm 0,5$	наличие собственной электронной пары у атома азота, обеспечивает формирование контактов между компонентом добавки и катионом металла тонкодисперсного наполнителя повышая связность бетонной смеси, оказывает каталитическое действие на реакционную активность компонентов бетонной смеси

Для увеличения связности высокоподвижной самоуплотняющейся бетонной смеси к исследуемым компонентам дополнительно вводили аминсодержащий полимер, представленный водным раствором пропилендиамина с плотностью  $\rho = 1,005 \text{ г/см}^3$  который оказывает каталитическое действие на компоненты бетонной смеси, повышая их реакционную активность и при этом способствует образованию контактов с катионами металлов тонкодисперсных наполнителей, что положительно влияет на связность бетонной смеси и прочность получаемого бетона.

Экспериментально определяли основные реологические свойства получаемой самоуплотняющейся бетонной смеси и прочность бетона на ее основе. Данные экспериментов представлены в таблицах 2.4 и 2.5 соответственно.

Таблица 2.4 – Оценка эффективности действия компонентов разрабатываемой комплексной химической добавки по расплыву конуса и раствороотделению

Расход цемента на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг	Компоненты комплексной химической добавки, % от массы портландцемента				В/Ц	Расплыв конуса, мм	Раствороотделение, % по ГОСТ Р 59715
	водн. р-р поликарб. полим. этилового эфира метакрил. к-ты с $\rho = 1,027 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 6 \pm 0,5$	водн. р-р поликарб. полим. ангидрида малеиновой к-ты с $\rho = 1,029 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 6,0 \pm 0,5$	Золь кремниевой кислоты с $\rho = 1,023 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 4,0 \pm 0,5$	диамин пропилен с $\rho = 1,005 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 9,0 \pm 0,5$			
460	контрольный состав				0,58	360	-
	0,5	0	0	0	0,41	564	18,0
	0,6	0	0	0		568	17,0
	0,7	0	0	0		572	17,0
	0,6	0,1	0	0		590	16,0
	0,6	0,2	0	0		595	15,5
	0,6	0,3	0	0		600	15,0
	0,6	0,2	0,5	0		615	14,0
	0,6	0,2	0,6	0		622	13,5
	0,6	0,2	0,7	0		624	13,5
	0,6	0,2	0,6	0,3		633	12,0
	0,6	0,2	0,6	0,5		638	11,5
	0,6	0,2	0,6	0,7		634	11,5

Установлено, что наибольший пластифицирующий эффект оказывает поликарбоксилатный полимер на основе этилового эфира метакриловой кислоты, использование которого обеспечивает максимальную подвижность 570 мм, измеряемую по показателю расплыва конуса. При данном водоцементном отношении, равном 0,41, видимых признаков расслоения и водоотделения у смеси не обнаружено. Дальнейшие эксперименты по оценке влияния компонентов

добавки проводили при данном значении водоцементного отношения. Данные полученных зависимостей влияния компонентов добавки на показатели подвижности и связности приводятся на графике (рисунок 2.1).

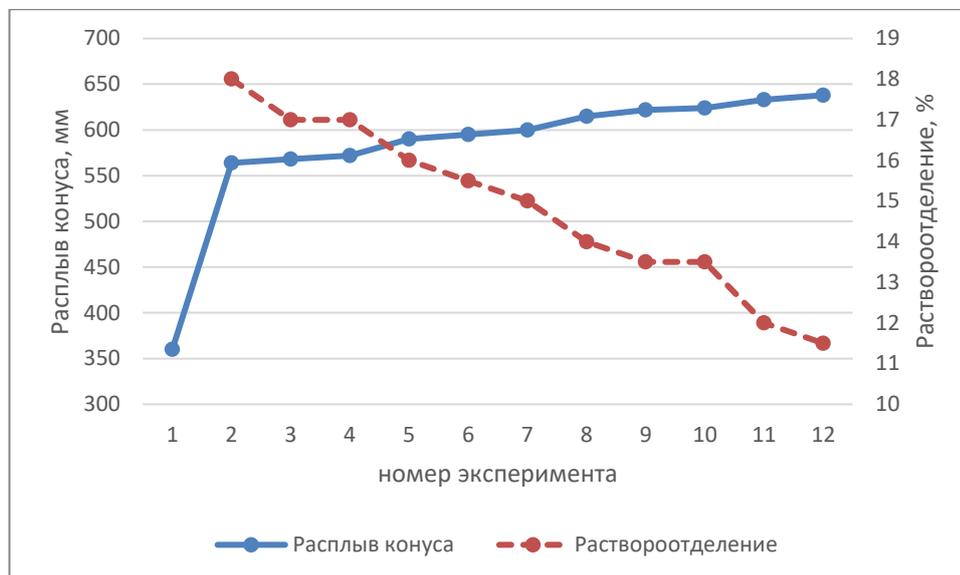


Рисунок 2.1 – Графики зависимости расплыва конуса и раствороотделения от состава химической добавки

При совместном действии двух поликарбоксилатных полимеров (ПКП) подвижность повышается на 65%, и при этом наблюдается повышение связности растворной смеси, по-видимому, в результате химического взаимодействия ПКП с образованием более сложных полимерных цепей.

Золь также способствует повышению подвижности в пределах 4-5% относительно двух ПКП и при этом связность смеси дополнительно улучшается, что, вероятно, обусловлено повышенной подвижностью нанодисперсий в бетонной смеси.

При дополнительном введении пропилендиамина, в присутствии остальных компонентов, подвижность увеличивается на 80% при визуальном повышении связности, что, видимо, обусловлено формированием контактов между атомами азота и компонентами СУБС, в основном тонкодисперсного наполнителя.

Следует отметить, что при добавлении каждого компонента разрабатываемой КХД возрастает подвижность смеси и уменьшается раствороотделение.

Таблица 2.5 – Оценка эффективности действия компонентов разрабатываемой комплексной химической добавки по показателям прочности полученного бетона в проектном возрасте

Расход цемента на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг	Компоненты комплексной химической добавки, % от массы портландцемента				Прочность на сжатие в возрасте 28 суток, МПа	Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток, МПа	Отношение $R_{изг} / R_{сж}$
	Водн. р-р поликарб. полим. этилового эфира метакрил. к-ты с $\rho = 1,027 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 6,0 \pm 0,5$	Водн. р-р поликарб. полим. ангидрида малеиновой к-ты с $\rho = 1,029 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 6,0 \pm 0,5$	Золя кремниевой кислоты с $\rho = 1,023 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 34,0 \pm 0,5$	Пропилендиамин с $\rho = 1,005 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 9,0 \pm 0,5$			
460	контрольный состав				43,6	4,9	0,117
	0,5	0	0	0	53,5	6,2	0,116
	0,6	0	0	0	54,3	6,4	0,118
	0,7	0	0	0	54,0	6,4	0,119
	0,6	0,1	0	0	55,8	6,6	0,118
	0,6	0,2	0	0	56,7	6,8	0,120
	0,6	0,3	0	0	56,7	6,8	0,120
	0,6	0,2	0,5	0	61,1	7,3	0,119
	0,6	0,2	0,6	0	62,0	7,6	0,123
	0,6	0,2	0,7	0	62,0	7,6	0,123
	0,6	0,2	0,6	0,3	68,1	8,3	0,122
	0,6	0,2	0,6	0,5	69,0	8,5	0,123
	0,6	0,2	0,6	0,7	69,0	8,5	0,123

Анализ данных таблицы 2.5, и данных, представленных на рисунке 2.2, показывает, каждый компонент разрабатываемой КХД оказывает положительное влияние на улучшение показателей прочности бетона. Одновременно увеличивается значение отношения  $R_{изг} / R_{сж}$ , что является косвенным признаком увеличения устойчивости бетона к трещинообразованию.

Совместное использование двух поликарбоксилатных полимеров увеличивает прочность бетона на 35% по сравнению с бездобавочным составом.

Дополнительное применение компонентов добавки в виде нанодисперсий и пропилендиамина увеличивают показатель прочность бетона на сжатие на 80%.

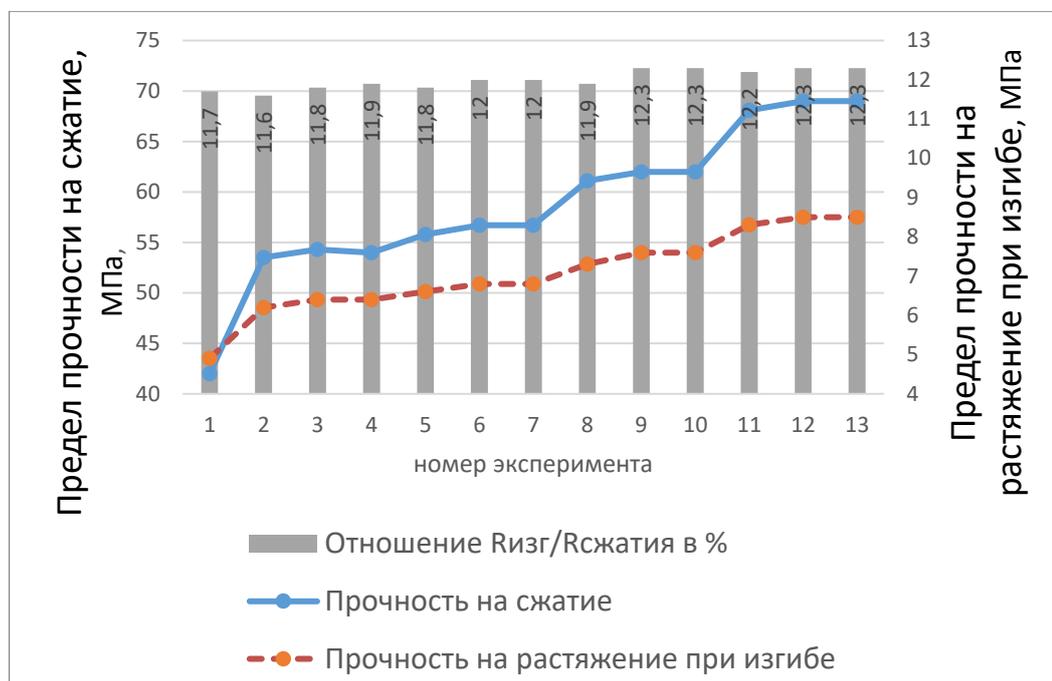


Рисунок 2.2 – Графики изменения значений показателей прочности от состава КХД

Нанодисперсии  $\text{SiO}_2$  (диоксида кремния) обладают повышенной поверхностной энергией за счет сформированной поверхности малого размера, в результате обладают повышенной реакционной активностью и способны принимать участие в реакциях синтеза между  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , а также с вновь образованными гидросиликатами. При добавлении данного компонента добавки наблюдается рост прочности, при этом в большей степени увеличивается прочность на растяжение при изгибе.

Значительное увеличение показателей прочности наблюдается при использовании пропилендиамина, который способен оказывать каталитическое действие на гидратационные процессы в бетонной системе при затвердевании. Рост прочности на сжатие и на растяжение при изгибе происходит в одинаковой степени.

Результаты экспериментов демонстрируют, что одновременное использование двух поликарбоксилатных полимеров в наибольшей степени увеличивает подвижность смеси при увеличении прочности на сжатие.

Компонент добавки в виде водного раствора золя кремниевой кислоты, который содержит нанодисперсии  $\text{SiO}_2$  диоксида кремния, оказывает наибольшее влияние на увеличение показателя прочности на растяжение при изгибе. Введение пропилендиамина оказывает положительное действие на связность бетонной смеси и увеличивает прочностные показатели бетона.

Результаты экспериментальных данных (таблицы 2.4 и 2.5) позволяют говорить о следующих полученных эффектах:

- наибольший пластифицирующий эффект достигается при совместном использовании поликарбоксилатов разной природы, что обеспечивает уменьшение В/Ц отношения в пределах 28% и при этом бетонная смесь соответствует марке РК1 по классификации ГОСТ 59714-2021.

- золь кремниевой кислоты оказывает дополнительное пластифицирующее и стабилизирующее действие по отношению к рассматриваемым поликарбоксилатам и полученное комплексное сочетание обладает гиперпластифицирующим эффектом, что подтверждается уменьшением В/Ц на 34,5%, при этом бетонная смесь при повышенном распыле конуса, равном 642 мм, характеризуется достаточной связностью. Также выявлено, что золь кремниевой кислоты способствует увеличению прочности бетона, причём прочность на растяжение при изгибе увеличивается в большей степени. Этот эффект может быть обусловлен образованием низкоосновных гидросиликатов, т.к. известно [184], что они обладают прочной пластинчатой или волокнистой структурой.

Важное действие на реологию смеси оказывает введение пропилендиамина, при этом прочностные показатели также увеличиваются.

Полученные положительные результаты в процессе научно-экспериментальных исследований подтверждают высказанные теоретические предположения об эффективности использования совместно поликарбоксилатных полимеров разной природы, один из которых является

реакционно-активным в присутствии портландцемента, дополнительное введение нанодисперсий в виде водного раствора золя кремниевой кислоты и азотосодержащих углеводородных полимеров, которые совместно обеспечивают создание высокоподвижной связной бетонной смеси и бетона повышенной прочности.

Определение рационального соотношения компонентов разрабатываемой добавки проводилось по величине удобоукладываемости (расплыв конуса) и по показателям прочности на сжатие и на растяжение при изгибе. В соответствии с проведенными исследованиями, рациональный состав комплексной химической добавки представлен в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Рациональное соотношение компонентов разрабатываемой комплексной химической добавки

Компонент комплексной химической добавки	Содержание компонента, %
водный раствор поликарбоксилатного полимера этилового эфира метакриловой кислоты малеиновой кислоты с $\rho = 1,027 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 6,0 \pm 0,5$	32
водный раствор поликарбоксилатного полимера ангидрида малеиновой к-ты с $\rho = 1,029 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 6,0 \pm 0,5$	10
золь кремниевой кислоты с $\rho = 1,023 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 4,0 \pm 0,5$	32
пропилендиамин с $\rho = 1,005 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 9,0 \pm 0,5$	26

Установлено, что разработанная комплексная химическая добавка обладает плотностью  $\rho = 1,020 \text{ г/см}^3 \pm 0,002$  и водородным показателем  $\text{pH} = 6,5 \pm 0,5$ .

Рациональное количество разработанной добавки для бетона определяли по показателям расплыва конуса по ГОСТ Р 59714 и по прочности на сжатие по ГОСТ 10180.

Результаты данных исследований представлены в таблице 2.7.

Экспериментально установлено, что наилучшие результаты достигаются при использовании разработанной комплексной химической добавки в диапазоне 0,8-1,2 % от массы портландцемента.

С целью обеспечения дополнительной подвижности, а также улучшения связности смеси целесообразно рассмотреть введение тонкодисперсных наполнителей разного происхождения.

Таблица 2.7 – Зависимость расплыва самоуплотняющейся бетонной смеси и прочности бетона от количества добавки

Расход цемента на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг	Кол-во разработанной КХД, % от массы цемента	В/Ц	Расплав конуса, см	Предел прочности на сжатие, МПа
460	0,6	0,39	60,0	66,3
	0,8	0,38	63,0	70,0
	1,0	0,37	63,3	70,8
	1,2	0,38	63,6	69,8
	1,4	0,38	63,9	67,9

Полученные зависимости на графиках дополнительно представлены на рисунках рисунке 2.3 и рисунке 2.4.



Рисунок 2.3 – Зависимость величины расплыва конуса от количества добавки

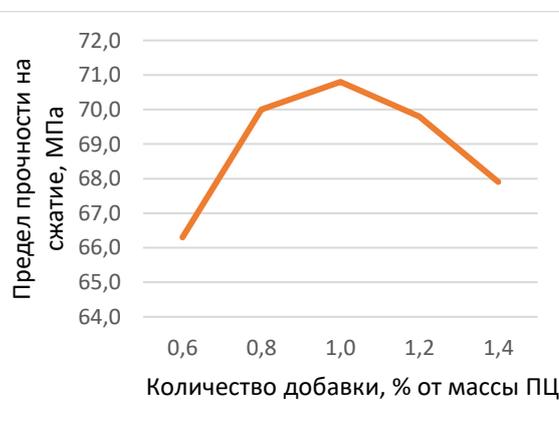


Рисунок 2.4 – Зависимость прочности на сжатие (28 суток) от количества добавки

Данные, представленные на рисунках 2.3 и 2.4, показывают, что наилучшие результаты по удобоукладываемости СУБС и прочности бетона на ее основе наблюдается при расходе КХД, равном 1% от массы портландцемента.

## 2.2 Определение основных сырьевых компонентов для создания эффективного самоуплотняющегося бетона

Для самоуплотняющейся бетонной смеси, с учетом ее свойства повышенной подвижности и высокой связности, важным фактором является действие высокоэффективной добавки. Дополнительное введение тонкодисперсных наполнителей в состав такой бетонной смеси должно увеличить подвижность при одновременном повышении связности и при возрастании прочностных показателей. Одними из наиболее широко распространенных наполнителей могут быть использованы техногенные наполнители, такие как зола уноса и тонкомолотый гранулированный доменный шлак, а также природный наполнитель - тонкомолотый известняк.

Данные материалы при соблюдении определенных условий, таких как эффективная химическая активация или особое электронное строение элементов, обеспечивают образование дополнительных контактов в бетонной системе повышая ее связность и оказывают положительное влияние на показатели прочности на сжатие или на растяжение при изгибе.

Для создания эффективной, связной, высокоподвижной бетонной смеси в качестве тонкодисперсного наполнителя рассматривали:

- природный известняк с удельной площадью поверхности  $S_{уд} \approx 320 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Тонкодисперсный известняк обладает повышенной сорбцией, таким образом, повышая связность высокоподвижной бетонной смеси за счет увеличения водоудерживающей способности. Согласно исследованиям, может способствовать увеличению прочности бетона за счет уплотнения и образования контактов в бетонной системе. Предположительно, в присутствии известняка возможно образование новых гидратных фаз в виде основного карбоната кальция;

- доменный молотый гранулированный шлак Череповецкого металлургического комбината по ГОСТ 3476-2019 (ТДГШ), с удельной площадью поверхности  $S_{уд} \approx 320 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Использование тонкомолотого доменного шлака дополнительно способствует повышению подвижности, оказывает положительное

влияние на уменьшение раствороотделения и водоотделения самоуплотняющейся бетонной смеси, а также повышает плотность формирующейся структуры бетона, формируя плотную и прочную структуру бетона, которая обладает пониженной усадкой, оказывает положительное влияние на прочность твердеющего бетона, а также может оказывать влияние на сокращение усадки.

- зола-уноса при добавлении в бетонную смесь улучшает реологию смеси в результате повышения пластичности, подвижности и связности смеси. Зола-уноса является побочным продуктом сжигания угольного топлива на тепловых электростанциях, состоит преимущественно из твердых сферических частиц и небольшого количества с некоторым включением полых элементов. Основными веществами золы-уноса является силикатное стекло, содержащее оксиды кремния, алюминия, железа и кальция. Бетонные смеси с добавлением золы уноса характеризуются пониженным водоотделением, уменьшением раствороотделения. Удельная площадь поверхности используемой золы-уноса также составляла 320 м<sup>2</sup>/кг.

Влияние рассматриваемых наполнителей на подвижность бетонной смеси и прочность бетона представлено в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Показатели подвижности и связности бетонной смеси, модифицированной КХД, в присутствии тонкодисперсных наполнителей, прочность бетона на сжатие

Расход цемента на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг	КХД, % от массы ПЩ	Тонкомолотый известняк, % от массы ПЩ	Тонкомолотый доменный шлак, % от массы ПЩ	Зола-уноса, % от массы ПЩ	В/Ц	Распльв конуса, мм	Прочность на сжатие в возрасте 28 суток, МПа	Раствороотделение, %,
460	-	контрольный состав			0,58	-	43,6	-
	1				0,41	640	70,8	11,5
	1	5	-	-		662	74,3	8,4
	1	10	-	-		680	75,2	7,7
	1	15	-	-		680	74,8	7,5

Продолжение таблицы 2.8

Расход цемента на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг	КХД, % от массы ПЩ	Тонкомолотый известняк, % от массы ПЩ	Тонкомолотый доменный шлак, % от массы ПЩ	Зола-уноса, % от массы ПЩ	В/Ц	Распływ конуса, мм	Прочность на сжатие в возрасте 28 суток, МПа	Раствороотделение, %
460	1	-	5	-	0,41	668	74,6	8,2
	1	-	10	-		690	75,0	7,5
	1	-	15	-		695	74,4	7,5
	1	-	-	5		680	71,6	8,9
	1	-	-	10		700	72,4	8,0
	1	-	-	15		710	72,0	7,9

Проведенные эксперименты подтверждают положительное воздействие использования в высокоподвижной бетонной смеси тонкодисперсных наполнителей разного происхождения на свойства смеси. Увеличиваются показатели связности и удобоукладываемости. Дополнительно увеличивается распływ смеси на (7 – 10) %, при этом раствороотделение снижается на (16 – 21) % по сравнению с составом без наполнителей.

Установлено, что рациональное количество тонкодисперсных наполнителей составляет 10% от массы цемента. При этом, в наибольшей степени повышается прочность бетона на сжатие при использовании тонкомолотого гранулированного доменного шлака и тонкомолотого магнезиального известняка. Введение данных наполнителей в бетонную смесь позволяет уменьшить показатели раствороотделения. Использование золы уноса в качестве тонкодисперсного наполнителя показывает наименьший прирост прочности на сжатие и параметра связности при наибольшем приросте подвижности смеси по расплыву конуса.

### 2.3 Выводы

Экспериментально установлено, что разработанная КХД обладает повышенным эффектом пластификации, обеспечивая создание СУБС марки РК1 (расплыв конуса 55-65 см), дополнительно уменьшая показатель раствороотделения, который более чем на 35% ниже значения относительно ГОСТ Р 59714, и составляет 11,5%, а в присутствии тонкодисперсных наполнителей подвижность смеси соответствует марке РК2 (расплыв конуса 66-75 см) и раствороотделение составляет 7,5 %, (превышает требования ГОСТ Р 59714 на 57%).

Полученные данные подтверждают, что разработанная бетонная смесь является высокоэффективной самоуплотняющейся и может быть рекомендована для ответственных объектов строительства: высотного домостроения, для густоармированных конструкций, в мостостроении и в транспортном строительстве.

### **3 ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАЗРАБОТАННОГО САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА И ОБРАЗУЮЩИЕСЯ ГИДРАТНЫЕ ФАЗЫ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО БЕТОНА**

Для углубленного исследования реологических характеристик бетонной смеси изучали поведение СУБС в присутствии разработанной комплексной химической добавки и тонкодисперсных наполнителей различного происхождения. Основные показатели бетонной смеси определяли по ГОСТ Р 59715-2022: подвижность по расплыву конуса, устойчивость смеси к расслоению по показателю раствоороотделения без динамического воздействия.

#### **3.1 Определение марок по подвижности «РК» и текучести «Т» самоуплотняющейся бетонной смеси**

Связность смеси определяли по параметру раствоороотделения следующим образом: изготовленную высокоподвижную смесь после отстаивания в контейнере в течение 15 минут, непрерывно подавали с высоты  $500 \pm 50$  мм на сито диаметром 300 мм, высотой не менее 30 мм с отверстиями 5 мм. После выдерживания смеси на сите в течение  $120 \pm 5$  секунд измеряли отношение массы образца, оставшейся на сите к массе, прошедшей сквозь сито. Полученные результаты представлены в таблице 3.1.

Определяли среднюю плотность бетонной смеси согласно методике, указанной в ГОСТ 10181, учитывая высокую подвижность смеси при исследованиях, в отличии от обычных бетонных смесей при операции уплотнения, вибрация или штыкование не допускаются.

Производили оценку параметра вязкости высокоподвижной бетонной смеси по методике, указанной в ГОСТ Р 59715 п. 9.2, измеряя время, требуемое для достижения расплыва конуса диаметром 500 мм;

Оценку параметра текучести смеси производили в соответствии с методикой ГОСТ Р 59715 п.10.2 методом блокирующего кольца. С этой целью использовали блокирующее кольцо с 16 вертикальными стержнями диаметром  $18,0 \pm 0,5$ мм,

равномерно закрепленными на кольце с диаметром  $300 \pm 2$  мм, подробная схема которого была ранее приведена на рисунке 1.3. Показатель определяется как результат измерения разности высоты расплыва смеси в центре кольца и высоты смеси за пределами блокирующего кольца, сразу после прохождения смеси вертикальных стержней, по четырем перпендикулярным направлениям (рисунок 3.1).

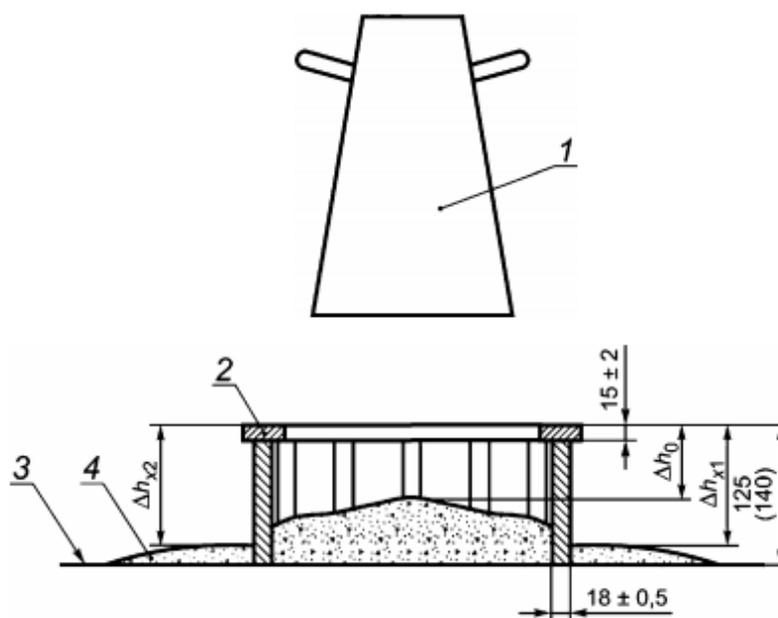


Рисунок 3.1 – Поперечный вид схемы эксперимента по определению текучести методом блокирующего кольца: 1 – конус Абрамса; 2 – блокирующее кольцо; 3 – базовая плита для испытания на расплыв смеси; 4 – бетонная смесь

Текучесть смеси вычисляется по формуле (3.1):

$$T = \frac{\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{x3} + \Delta h_{x4}}{4} - \Delta h_{x0}, \quad (3.1)$$

где  $\Delta h_0$ ,  $\Delta h_{x1}$ ,  $\Delta h_{x2}$  - разности высот между верхним краем блокирующего кольца и определенными точками бетонной смеси.

Значение текучести, согласно нормативам ГОСТ Р 57514, не должно превышать 10 мм.

Полученные реологические характеристики самоуплотняющейся бетонной смеси в присутствии разработанной комплексной химической добавки и тонкодисперсных наполнителей представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Сравнительные реологические характеристики самоуплотняющейся бетонной смеси

Расход цемента кг/м <sup>3</sup> СУБС	Кол-во разработанной КХД, % от массы цемента	тонкодисперсные наполнители, % от массы цемента		Распływ конуса, мм	Связность СУБС по величине растворотделения, по ГОСТ Р 59715, %	Водоцементное отношение	Вязкость СУБС растекание до достижения величины 500 мм, 1500, с	Текущность по методу блокирующего кольца, мм
		извест- няк	домен- ный шлак					
460	1,0	-	-	640	11,5	0,41	3,5	6,0
		10,0	-	680	7,7		7,0	5,0
		-	10,0	690	7,5		6,0	4,0

Результаты, представленные в таблице 3.1, показывают, что разработанная КХД является высокоэффективной, обеспечивая создание СУБС марки РК1 (с распльвом конуса 64 см) и при этом показатель растворотделения составляет 11,5%, что ниже требований ГОСТ Р 59714 на 35%. В сочетании с тонкодисперсными наполнителями в количестве 10% от массы портландцемента добавка обеспечивает создание СУБС с маркой РК2 с распльвом конуса 66-75 см с пониженной на 57% величиной растворотделения, которая составляет 7,7-7,5%, подтверждая, что разработанная бетонная является высокоэффективной самоуплотняющейся.

### 3.2 Определение основных физических свойств бетона

Для оценки прочности на сжатие были изготовлены кубы размером 100x100x100 мм. Прочность на растяжение при изгибе и призмную прочность определяли с использованием образцов - призм с размером 100x100x400 мм. Для измерения призмной прочности использовали методику, регламентированную ГОСТ 24452. Усадка бетона измерялась согласно указаниям методики ГОСТ 24544. Процесс твердения всех изготовленных образцов проходил в камере нормального твердения «Контрос» (рисунок 3.2) при параметрах  $T = 20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и влажности  $W \geq 95\%$ .



Рисунок 3.2 – Камера нормального твердения «Контрос»

Эксперименты по установлению различных видов прочности образцов бетона в возрасте 7 суток, а также в возрасте 28 суток (проектном), проводили на испытательном прессе ТП-Т-1500, который демонстрируется на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Пресс ТП-Т1500

Сравнительные результаты определения прочности и усадки бетона, изготовленного на основе контрольного состава и самоуплотняющейся бетонной смеси представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Показатели прочности и усадки бетона на основе разработанной высокоподвижной бетонной смеси, модифицированной комплексной химической добавкой в присутствии тонкодисперсных наполнителей

Расход цемента на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг	Кол-во разработанной КХД, % от массы ПЩ	Тонкомолотый известняк, % от массы ПЩ	Тонкомолотый доменный шлак, % от массы ПЩ	Плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа		Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Призмная прочность, МПа (% от прочности на сжатие)	Деформация садки, мм/м
					возраст, сутки				
					7	28	28	28	
460	-	-	-	2276	28,6	43,6	5,10	30,8 (71%)	1,4
	1,0	-	-	2210	57,8	70,8	8,70	58,0 (82%)	0,4
	1,0	10	-	2232	60,0	75,2	9,40	62,4 (83%)	0,3
	1,0	-	10	2228	69,8	75,0	9,45	62,3 (83%)	0,3

Установлено, что использование разработанной комплексной химической добавки повышает проектную прочность на сжатие бетона на 70% относительно контрольного состава. Использование тонкодисперсных наполнителей увеличивает прочностные показатели бетона, рост составляет 76 – 77%. В возрасте 7 суток показатели прочности бетона с разработанной добавкой в присутствии наполнителей составляют  $\approx 80\%$  от проектного значения, в то время как у контрольного состава рост прочности составляет 68% от проектного значения.

Бетон на основе разработанной СУБС обладает повышенной прочностью на растяжение при изгибе, которая составляет 84-85%, обеспечивая повышенную устойчивость бетона к трещинообразованию, косвенным показателем которого является отношение  $R_{изг} / R_{сж} = 0,125-0,126$ . Данный коэффициент превышает допустимый показатель ГОСТ 10180 приложение Л, что коррелирует с высокими

показателями призмной прочности, составляющей 82 - 83% от величины прочности на сжатие (кубиковой прочности), что значительно превышает показатели, полученные у контрольного состава.

Усадка самоуплотняющегося бетона (СУБ) характеризуется пониженным значением: 0,4 – 0,3 мм/м. Пониженная усадка, по-видимому, обусловлена образованием прочных контактов в формирующейся структуре бетона.

Водопоглощение полученного бетона измеряли по методике ГОСТ 12730.3 - 2020; показатели водонепроницаемости оценивали согласно указаниям ГОСТ 12730.5-2018, морозостойкость ГОСТ 10060-2012. Эксперименты по установлению показателей морозостойкости изготовленных образцов различного состава проводили используя третий метод (ускоренный). Процедура проводилась в специальной климатической камере, изображенной на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Камера для определения морозостойкости

Автоматизация процесса позволяет получать высокую степень воспроизводимости и надежности результатов, использование третьего метода сокращает время, необходимое для получения данных. Согласно указаниям методики ГОСТ 10060 водонасыщение, замораживание и оттаивание

производилось в 5% растворе NaCl, замораживание проводилась при температуре минус 50°C.

Для проведения испытаний изготавливались образцы кубы с размером ребра 100 мм общим количеством 12 штук для каждого состава бетона, из которых 6 являлись контрольными, остальные 6 образцов использовались для проведения измерений.

Измерение водонепроницаемости изучаемых составов проводилось с использованием методики, указанной в ГОСТ 12730.5. Для этого использовали образцы цилиндрической формы, высота и диаметр у которых равнялся 15 см. Производилось по шесть образцов состава бетона. Предварительно образцы выдерживались в течение 28 суток в нормальных условиях твердения. Для экспериментов была использована специализированная установка УФФ-6, изображение которой представлено на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Прибор УФФ-6 для определения водонепроницаемости бетона

Результаты проведенных исследований представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Сравнительные показатели бетона на основе разработанной самоуплотняющейся бетонной смеси

Расход цемента на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг	Кол-во разработанной КХД, % от массы ПЩ	Тонкомолотый наполнитель, % от массы цемента		Водопоглощение W <sub>m</sub> , %	Марка по водонепроницаемости	Марка по морозостойкости F <sub>2</sub>
		известняк	доменный шлак			
460	-	-	-	3,9	W8	200
	1,0	-	-	3,4	W12	400
	1,0	10	-	3,1	W14	400
	1,0	-	10	3,2	W14	400

Установлено, что бетон на основе разработанной бетонной смеси характеризуется величиной водопоглощения  $W_m = 3,1\%$ . Бетон в присутствии разработанной КХД и тонкодисперсных наполнителей отличается более плотной структурой относительно контрольного состава.

Водопоглощение бетона уменьшается на 13 – 21% относительно контрольного бездобавочного состава. Водонепроницаемость бетона на основе разработанной самоуплотняющейся бетонной смеси повышается на 75% до марки W14.

Морозостойкость модифицированного бетона по сравнению с контрольным составом увеличивается в 2 раза, до марки F<sub>2</sub>400, что, может быть обусловлено следующими факторами:

- повышением плотности структуры бетона;
- образованием большего количества гидратных фаз;
- понижением температуры замерзания воды в порах бетона в присутствии солей пропилендиамина который используется в качестве компонента разрабатываемой комплексной химической добавки.

### 3.3 Определение фазовых изменений, происходящих при твердении бетона

Инфракрасную спектроскопию проводили на ИК-спектрографе фирмы «Shimadzu», представленном на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – ИК спектрограф фирмы «Shimadzu» IR Spirit

Проведенные исследования при помощи методов инфракрасной спектроскопии позволило установить, что комбинированное одновременное применение двух поликарбоксилатных полимеров, один из которых представлен полимером на основе этилового эфира метакриловой кислоты, второй используемый компонент представляет собой полимер на основе ангидрида малеиновой кислоты, на фоне присутствия портландцемента, обеспечивает взаимодействие между указанными компонентами, с образованием более сложных и разветвленных цепей по реакции, представленной на рисунке 3.7, начиная с раннего возраста, что подтверждается выявленным увеличением полос поглощения в области  $1240\text{ см}^{-1}$  и появлением новой полосы поглощения в области  $1310\text{ см}^{-1}$ . Обнаруженные полосы поглощения при проведении ИК-спектроскопии приведены на рисунке 3.8.



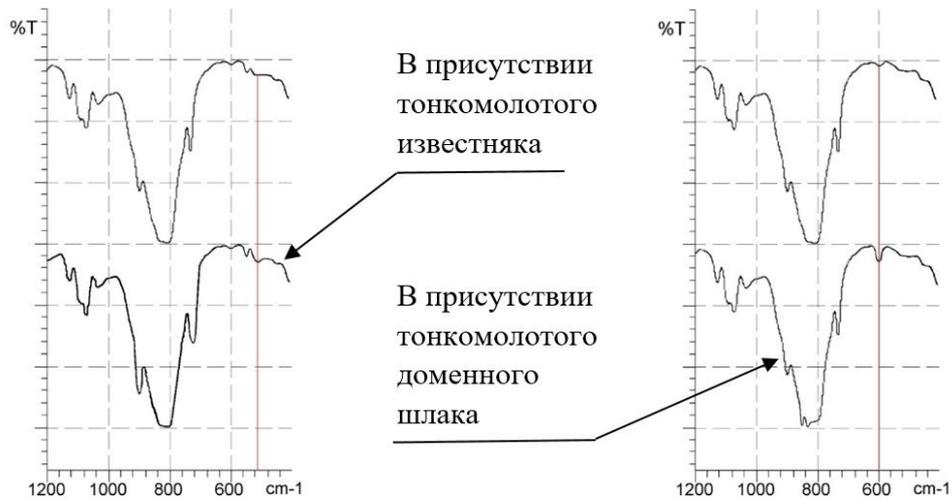


Рисунок 3.9 – Спектрограммы взаимодействия аминов с известняком (слева) и тонкомолотым гранулированным доменным шлаком (справа)

Исследования проводились методами рентгенофазового и дифференциально-термического анализа. Использовался рентгеновский дифрактометр ЭКРОС XRD-9500, представленный на рисунке 3.10, для проведения рентгенофазового анализа продуктов гидратации бетона.



Рисунок 3.10 – Дифрактометр рентгеновский ЭКРОС XRD-9500

Рентгенограммы, полученные при исследовании продуктов гидратации бетона, показаны на рисунках 3.11 и 3.12.

Рентгенограммы были получены для образцов бетона после твердения в нормальных условиях в течение 28 суток.

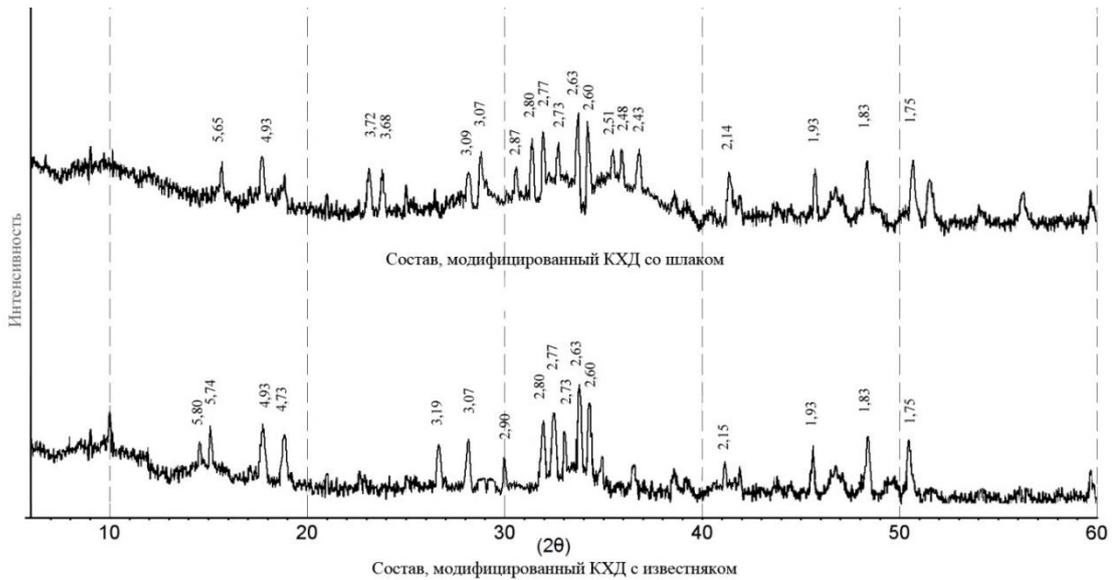


Рисунок 3.11 – Рентгенограммы продуктов гидратации бетона в возрасте 28 суток контрольного образца и бетона, модифицированного КХД, в присутствии известняка

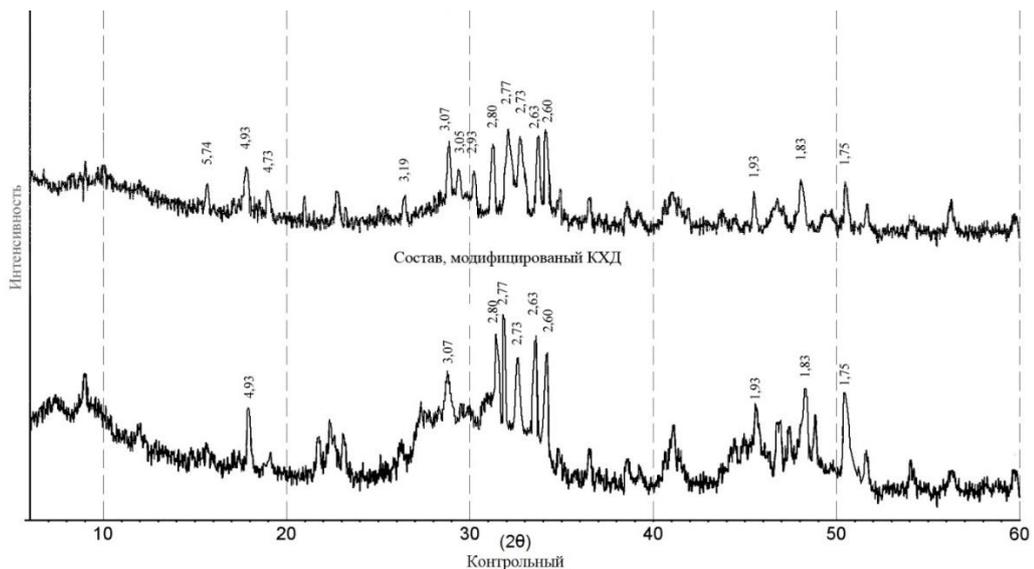


Рисунок 3.12 – Рентгенограммы продуктов гидратации бетона в возрасте 28 суток контрольного образца и бетона, модифицированного КХД, в присутствии шлака

При сравнении рентгенограмм можно наблюдать, что продукты гидратации бетона, модифицированного КХД в присутствии тонкодисперсных наполнителей обнаруживают меньшую интенсивность линий, относящихся к трёхкальциевому силикату  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  при  $d/n = (2,77; 2,73; 2,60; 1,75)\cdot 10^{-10}\text{м}$ , следовательно имеет место более высокая степень гидратации основного минерала портландцемента. В качестве основных продуктов, образующихся в процессе твердения обнаружен тоберморитоподобный гидросиликат  $\text{CSH(I)}$  при  $d/n = (3,07; 2,8; 1,83) 10^{-10}\text{м}$ .

Нанодисперсии гидроксида кремния (компонент добавки), в результате повышенной реакционной активности вступают в реакции синтеза с портландитом и вновь образованными гидросиликатами кальция, образуя гидросиликаты по следующей реакции (3.2):



Повышается интенсивности линий, характерных для CSH(I), и появляются новые линии при  $d/n = (5,74; 4,73; 3,19; 2,84; 2,74) \cdot 10^{-10}\text{м}$ , соответствующие афвиллиту ( $3\text{CaCO}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), который имеет удлинённые призматические кристаллы, а также обнаружены линии, характерные для низкоосновного гидросиликата окенита ( $3\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) при  $d/n = (3,05; 2,93; 2,77) \cdot 10^{-10}\text{м}$ . Известно, что для окенита характерна кристаллизация в виде удлинённых волокон.

При введении в систему тонкодисперсного известняка дополнительно обнаружены новые фазы небольшой интенсивности, представленные основным карбонатом кальция  $2\text{CaCO}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  при  $d/n = (5,80; 2,90; 2,15) \cdot 10^{-10}\text{м}$ .

В присутствии тонкомолотого доменного шлака обнаружены фазы шлака, представленные твердым раствором окерманита  $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$  при  $d/n = (3,72; 3,09; 2,87; 2,48) \cdot 10^{-10}\text{м}$  и геленита  $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  при  $d/n = (3,71; 2,85; 2,43) \cdot 10^{-10}\text{м}$  и небольшое количество вновь образованного гидросиликата магния  $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  при  $d/n = (5,65; 3,68; 2,51; 2,14) \cdot 10^{-10}\text{м}$ .

Дифференциально-термические исследования были проведены на установке «Термоскан-2», фото которого представлено на рисунке 3.13.



Рисунок 3.13 - Установка Термоскан-2

Данные рентгенофазового анализа согласуются с результатами дифференциально-термического исследования. Образование тоберморитоподобного гидросиликата CSH(I) подтверждается наличием эндоэффектов в области  $T = 137^\circ\text{C}$  и  $T = 183^\circ\text{C}$ , а также при  $T = 720^\circ\text{C}$ , которые соответствуют дегидратации CSH(I), и экзоэффектов в области  $T = 830^\circ\text{C}$ . Небольшой эндоэффект в области  $T = 537^\circ\text{C}$  соответствует дегидратации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . В присутствии КХД наблюдается эндоэффект при  $T = 529^\circ\text{C}$ , характерный для дегидратации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , что, по-видимому, обусловлено уменьшением количества  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в результате его взаимодействия с нанодисперсиями  $\text{SiO}_2$  и образованием гидросиликатов типа CSH(I).

Дополнительно обнаружены небольшие эндоэффекты при  $T = 320^\circ\text{C}$  и  $T = 470^\circ\text{C}$ , соответствующие дегидратации афвиллита, а также при  $T = 730^\circ\text{C}$ , обусловленные дегидратацией окенита. Эндоэффект при  $T = 380^\circ\text{C}$  соответствует дегидратации основного карбоната кальция  $2\text{CaCO}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ; и эндоэффекты в области температур при  $T = 150^\circ\text{C}$  и  $T = 700^\circ\text{C}$  характерны для дегидратации гидросиликата магния  $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .

Полученные кривые дифференциально-термического анализа представлены на рисунках 3.14-3.16.

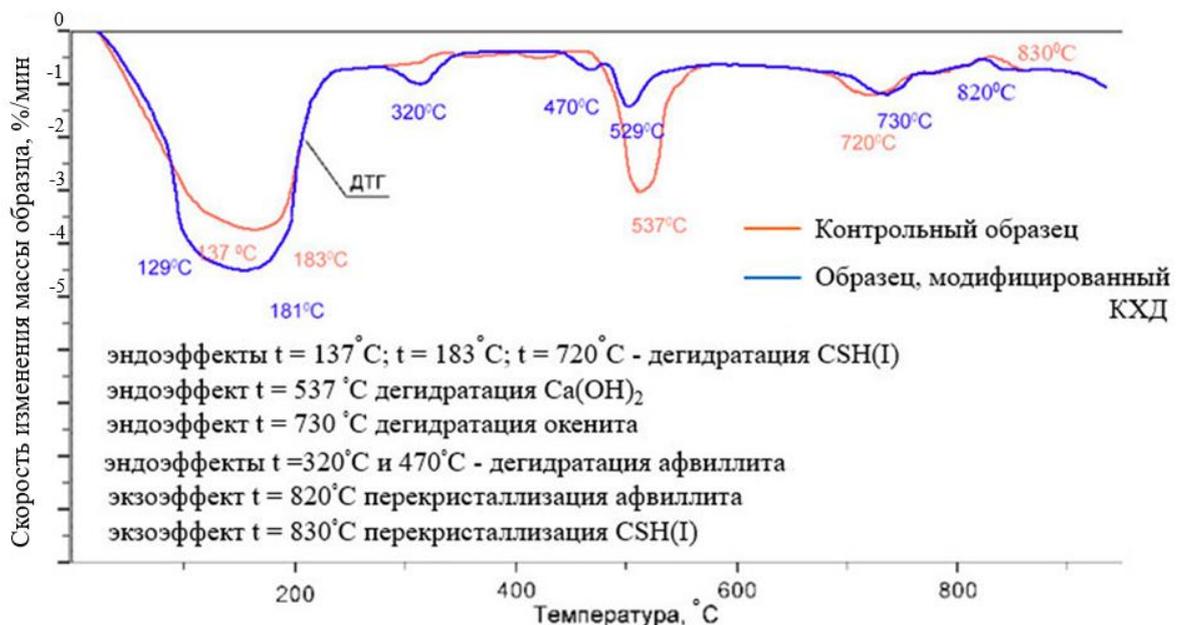


Рисунок 3.14 – Кривые деривативной термогравиметрии контрольного и модифицированного КХД состава бетона

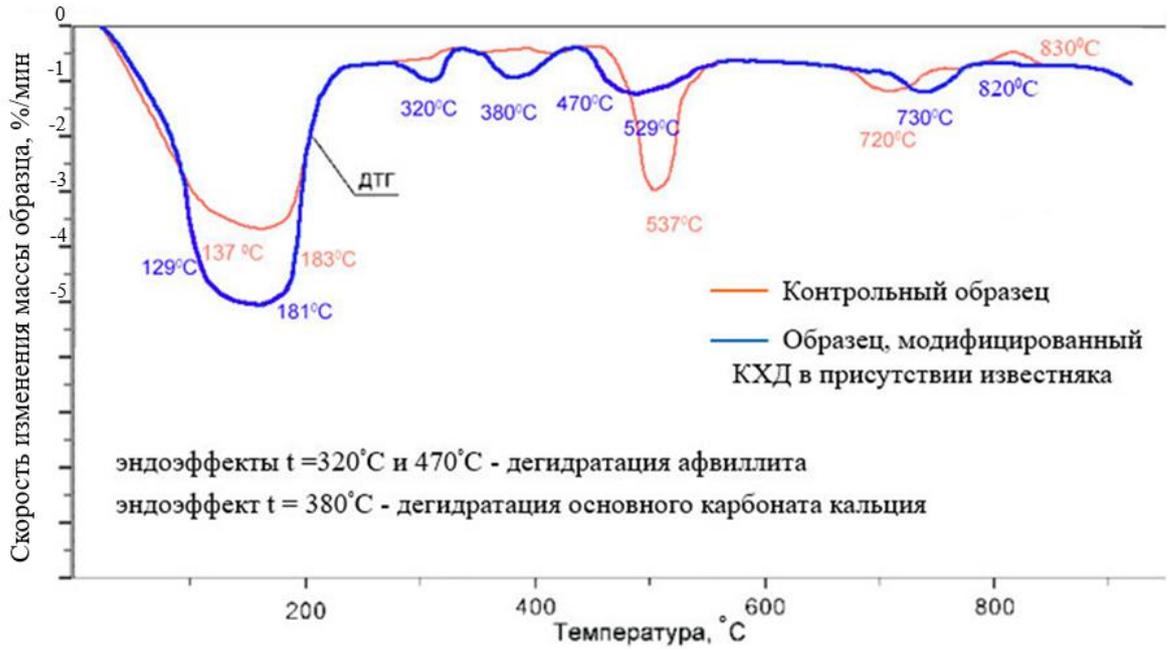


Рисунок 3.15 – Кривые деривативной термогравиметрии контрольного и модифицированного КХД состава бетона, в присутствии известняка

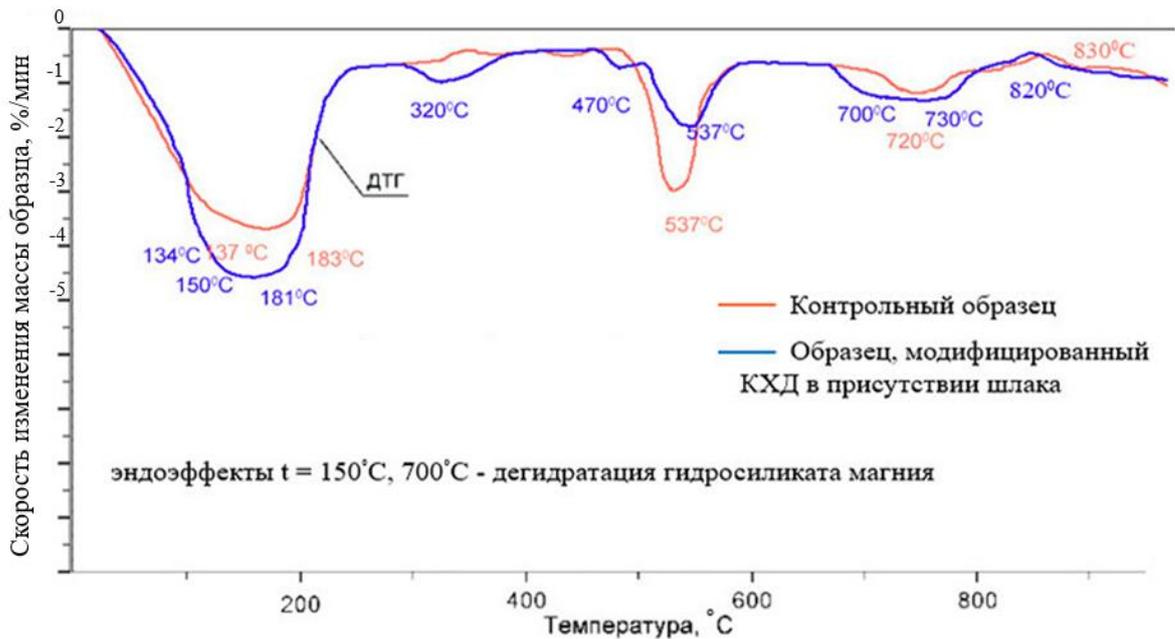


Рисунок 3.16 – Кривые деривативной термогравиметрии контрольного и модифицированного КХД состава бетона, в присутствии шлака

Физико-химические исследования, результаты которых были представлены ранее, показали, что суммарные потери у образца бетона, модифицированного разработанной добавкой, которые на 53 - 61% превышают суммарные потери контрольного состава бетона.

### 3.4 Выводы

Результаты выполненных физико-химических исследований подтверждают теоретические предположения повышения прочности бетона на основе высокоподвижной бетонной смеси, модифицированной разработанной комплексной химической добавкой, в результате повышения степени гидратации компонентов.

Показано, что в процессе твердения все компоненты комплексной химической добавки оказывают влияние на повышение реакционной активности компонентов системы, обеспечивая дополнительное образование новых гидратных фаз, таких как как окенит  $3\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  и афвиллит  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , кристаллизующихся в виде удлиненных волокон и обладающих повышенной твердостью.

#### **4 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ БЕТОННОЙ СМЕСИ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ РАЗРАБОТАННОЙ ДОБАВКОЙ, И ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА ЕЕ ОСНОВЕ**

За последние два века бетонные составы прошли эволюцию от четырехкомпонентной смеси до сложных многокомпонентных композиций, содержащих семь и более ингредиентов [172]. На современном этапе развития технологий создание эффективных бетонных смесей и бетонов с определенными свойствами требует использования множества компонентов, которые взаимодействуют друг с другом.

Для создания самоуплотняющегося бетона, разработанного в конце 80-х годов 20 века профессором Окамурой в Японии, необходимо использовать не менее пяти компонентов, а в настоящее время как правило используется уже не менее шести. К стандартным компонентам относятся: вода, цемент, мелкий заполнитель (песок), грубый заполнитель (щебень), а также суперпластификатор, тонкодисперсный наполнитель, в последнее время стали применять наночастицы. Эти компоненты и их соотношение должны быть тщательно подобраны для обеспечения необходимых свойств смеси, таких как высокая подвижность, отсутствие расслоения и определенная текучесть. Кроме того, важно учитывать характеристики готового бетона, такие как: плотность, различные виды прочности (на сжатие и на растяжение при изгибе), а также его устойчивость к негативным воздействиям внешней среды, включая морозостойкость, водонепроницаемость и коррозионную стойкость.

Для разработки материала, обладающего подобным набором свойств, состоящего из множества компонентов, необходимо провести большое количество экспериментов по оптимизации его состава. Эти исследования направлены на исследование воздействия свойств каждого компонента и их взаимосвязи в общей смеси. Хотя параметры компонентов часто варьируются в узком диапазоне значений, общее время и трудозатраты на разработку композиции значительно возрастают. Разработка теоретической модели, которая будет учитывать вклад каждого компонента и их взаимное влияние, является крайне сложной задачей.

В настоящее время существуют решения по моделированию оптимального гранулометрического состава бетона с минеральными наполнителями [173, 174] на основе теории плотности упаковки заполнителей, которая выделяет два основных фактора: толщину обмазки зерен заполнителей цементной пастой и вязкость цементной пасты. Тем не менее, данная модель не дает однозначный ответ о достаточности влияния данных факторов при описании подвижности бетонной смеси, которая является одним из важнейших свойств самоуплотняющейся бетонной смеси.

Для задач проектирования составов бетона широко используются расчетные зависимости, которые лежат в основе некоторых алгоритмов многопараметрического программирования свойств бетонов с нормируемыми прочностными и другими свойствами [178].

Математическое моделирование для планирования экспериментов, а также анализа свойств получаемых материалов было разработано авторами работ [179, 180] еще с начала 70-х годов прошлого века, в частности, для бетонов разного состава, с использованием полиномиальных моделей для описания систем состав – свойства. Дальнейшее развитие данного подхода предложено, в частности, для моделирования многокомпонентных модифицированных мелкозернистых фибробетонов [175, 176, 177].

Разработана и внедрена методология структурно-имитационного численного моделирования, основанная на представлении структуры цементных композиций как многоуровневой иерархической модели, которая позволяет прогнозировать свойства и проектировать материал с эффективной структурой [181, 182].

#### **4.1 Описание модели линейной множественной регрессии и ее исследование**

Используя результаты экспериментов, представленные в таблицах 2.4 и 2.5, рассчитана численная модель, позволяющая оценить воздействие каждого компонента разработанной химической добавки, как входного фактора, на

получаемые свойства бетонной смеси и бетона, служащие выходными факторами модели.

Полный факторный эксперимент требует проведения слишком большого числа испытаний, поэтому на этапе планирования было принято решение об экспериментальных исследованиях воздействия четырех компонентов добавки при их последовательном вводе. На каждом шаге оставляем дозировку по наилучшему результату, достигнутому на предыдущем этапе.

Помимо получения численных зависимостей, интерпретацию результатов экспериментов по оценке воздействия различных химических компонентов на бетонную смесь можно расширить при использовании аппарата линейной множественной регрессии. В данной модели входными независимыми переменными  $\bar{x}$  будут являться компоненты добавки, которые последовательно вводятся, а зависимыми (или объясняемыми) переменными  $\bar{y}$ , являются оцениваемые характеристики бетонной смеси и прочностные показатели бетона на ее основе.

**Постановка задачи множественной регрессии:** имеются значения тринадцати экспериментальных опытов, которые представлены в таблицах 2.4 и 2.5, где отражено совместное изменение входных 4 параметров  $\bar{x}$  и выходных параметров  $\bar{y}$ , где  $(y_{j,i}, x_{j,i})$ :  $j = 1, 2, \dots, 4$ ;  $i = 1, 2, \dots, 13$ . Требуется рассчитать аналитическую зависимость  $y_k = f_k(x_1, x_2, \dots, x_4)$ ,  $k = 1, 2, 3, 4$ , которая описывает наилучшим образом данные наблюдений. В случае множественной линейной регрессии отклик  $y$  линейно зависит от факторов  $x_1, x_2, x_3, x_4$ :

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + \varepsilon, \quad (4.1)$$

где  $b_0 \dots b_4$  – коэффициенты регрессии;  $\varepsilon$  - ошибка наблюдения.

Как правило с этой целью используется метод наименьших квадратов (МНК). В данном методе минимизируется сумма полученных квадратов отклонений результатов по аналитической модели и эмпирических данных, результатов опытов. Коэффициент  $b_0$  отражает влияние фиктивного фактора  $x_0 = 1$  на выходной параметр  $y$ .

Представим модель в матричной форме (4.2):

$$Y = Xb + \vec{\varepsilon}, \quad (4.2)$$

где  $Y = (y_1 \dots y_n)$  – вектор выходного параметра, матрица  $X$  имеет вид (4.3):

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{1,1} & \dots & x_{4,1} \\ 1 & x_{1,2} & \dots & x_{4,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{1,n} & \dots & x_{4,n} \end{pmatrix}, \quad (4.3)$$

где  $\vec{b} = (b_0, \dots, b_4)$  – вектор искомых коэффициентов,  $\vec{\varepsilon} = (\varepsilon_0, \dots, \varepsilon_n)$  – вектор ошибок.

Оценки коэффициентов  $b_0 \dots b_4$  получим по МНК, состоящим в минимизации целевой функции (4.4):

$$(Y - Xb)^T (Y - Xb) \longrightarrow \min. \quad (4.4)$$

В этом случае система уравнений для определения коэффициентов вектора  $\vec{b} = (b_0, \dots, b_4)$  имеет вид (4.5):

$$X^T Xb = X^T Y, \quad (4.5)$$

откуда

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4.6)$$

Получены решения уравнения регрессии по всем выходным факторам.

Разработанные линейные модели хорошо согласуются с результатами экспериментов, что подтверждают графики, представленные на рисунках 4.1-4.4.

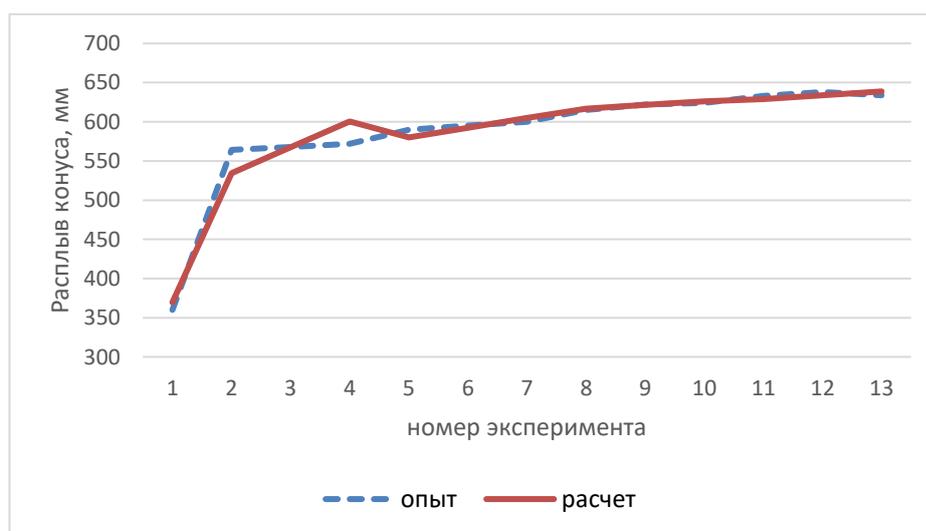


Рисунок 4.1 – Зависимости, полученные по параметру «расплыв конуса» в ходе экспериментов и по модели множественной регрессии

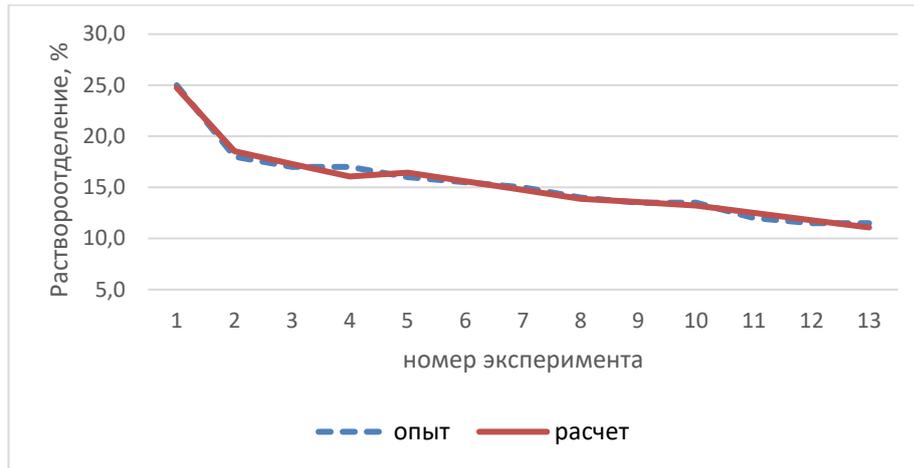


Рисунок 4.2 – Зависимости, полученные по параметру раствороотделение в ходе экспериментов и по модели множественной регрессии

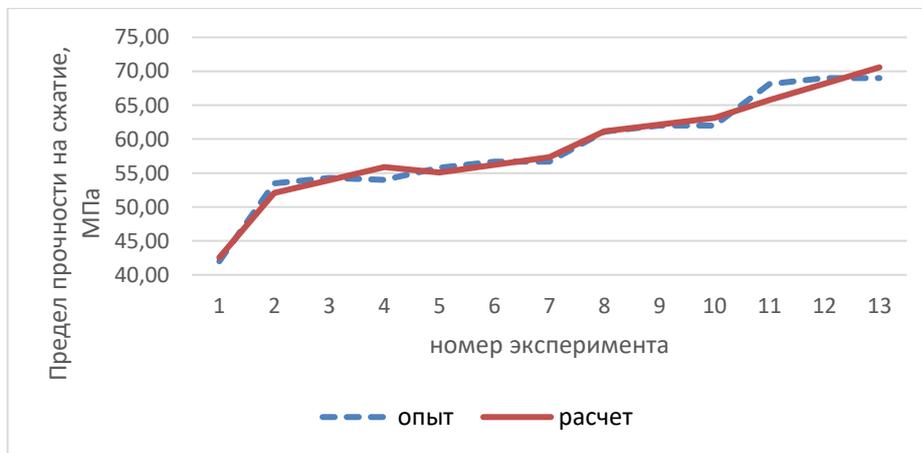


Рисунок 4.3 – Зависимости, полученные по параметру «прочность на сжатие» (возраст 28 суток) в ходе экспериментов и по модели множественной регрессии

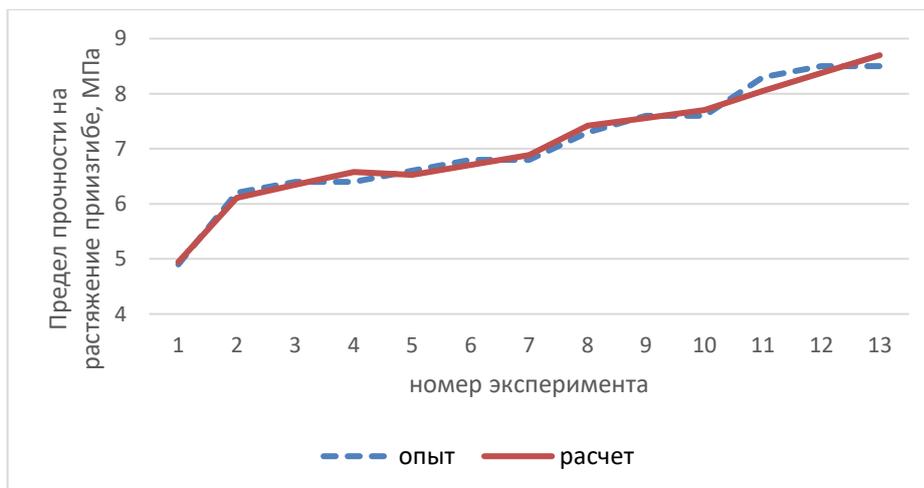


Рисунок 4.4 – Зависимости, полученные по параметру «прочность на растяжение при изгибе» (возраст 28 суток) в ходе экспериментов и по модели множественной регрессии

Рассчитанные коэффициенты в уравнениях регрессии по каждому выходному параметру представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Полученные коэффициенты в уравнениях регрессии

Параметр	Коэффициенты				
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
$y_1$	369,6482	329,4456	125,9473	48,29081	24,67566
$y_2$	24,75263	-12,421	-8,47243	-3,41745	-3,53329
$y_3$	42,55136	19,04078	11,2884	9,880745	12,03261
$y_4$	4,944487	2,334612	1,802489	1,425134	1,625002

С помощью критерия Фишера оценивали значимость каждого регрессионного уравнения. Табличные значение при уровне значимости ( $\alpha = 0,05$ ;  $k_1 = 4$   $k_2 = 8$ ),  $F = 3,84$ .

Критерии Фишера и значимость полученных регрессионных уравнений показаны в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Критерии Фишера и значимость полученных регрессионных уравнений

Параметр	F-критерий	Значимость
$Y_1$ Расплав	62,14974	$4,61 \cdot 10^{-6}$
$Y_2$ Раствороотделение	139,1367	$1,99 \cdot 10^{-7}$
$Y_3$ Прочность на сжатие	78,9821	$1,82 \cdot 10^{-6}$
$Y_4$ Прочность на растяжение при изгибе	120,4627	$3,51 \cdot 10^{-7}$

Откуда следует, что вероятность ошибки существенно ниже, чем уровень значимости  $\alpha = 0,05$ , следовательно, все полученные уравнения значимы.

На основании полученных данных вычислены безразмерные коэффициенты  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ , для удобства оценки влияния каждого из входных параметров на выходные данные. Коэффициенты представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Стандартизованные коэффициенты полученных регрессионных уравнений

Параметр	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$
$Y_1$ Распływ	0,778015	0,181211	0,208985	0,079574
$Y_2$ Раствороотделение	-0,59086	-0,24554	-0,2979	-0,22951
$Y_3$ Прочность на сжатие	0,429697	0,155204	0,408614	0,370795
$Y_4$ Прочность на растяжение при изгибе	0,385105	0,181146	0,43079	0,366029

Установлено, при проведении математической обработки результатов научно-экспериментальных исследований, что все компоненты комплексной химической добавки оказывают положительное влияние на исследуемые параметры. Наибольшее влияние: на подвижность бетонной смеси оказывают поликарбоксилатные полимеры; на растворотделение все компоненты добавки, примерно, в одинаковой степени; на прочность бетона нанодисперсии  $SiO_2$  и пропилен диамин. Результаты моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментов.

Кроме того, проведен анализ значимости каждого входного фактора на каждый выходной отклик с помощью критериев Стьюдента и Фишера. Результаты представлены ниже:

*Значения критериев Стьюдента.*

Табличное значение при уровне значимости ( $\alpha = 0,05$ ; число степеней свободы 8, *t-критерий* = 2,306) представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Табличное значение критериев Стьюдента

Параметр	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
$Y_1$ Распływ	11,476	2,286	2,432	1,065
$Y_2$ Раствороотделение	-12,927	-4,594	-5,142	-4,555
$Y_3$ Прочность на сжатие	7,121	2,199	5,343	5,575
$Y_4$ Прочность на растяжение при изгибе	7,8486	3,157	6,923	6,767

*Значения частных коэффициентов Фишера*

Табличное значение F – критерия при уровне значимости ( $\alpha = 0,05$ ;  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = 8$ ) указано в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Табличные значения частных коэффициентов Фишера

Параметр	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
$Y_1$ Расплав	110,586	8,673	16,159	1,275
$Y_2$ Раствороотделение	273,327	39,002	8,101	2,030
$Y_3$ Прочность на сжатие	51,719	4,022	28,055	30,727
$Y_4$ Прочность на растяжение при изгибе	8,0128	1,014	143,743	19,627

Полученные данные позволяют проводить детальный анализ влияния каждого входного фактора на выходные свойства. Например, по параметру «расплав» пропилендиамин не оказывает существенного воздействия, но играет существенную роль в формировании прочности на сжатие и на растяжение при изгибе.

С целью дальнейшего углубленного изучения оценок коэффициентов регрессионных уравнений были получены ковариационные матрицы  $C_{Y_i}$  для каждого уравнения регрессии (4.7):

$$(X^T * X)^{-1} \cdot S^2 \quad (4.7)$$

Ковариационные матрицы для регрессионных уравнений по выходным параметрам  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$  соответственно, имеют следующий вид (4.8-4.11):

$$C_{Y_1} = \begin{pmatrix} 233,4218 & -382,835 & -15,9872 & -0,8578 & -0,01571 \\ -382,835 & 824,0992 & -479,616 & -25,7341 & -0,47132 \\ -15,9872 & -479,616 & 3036,573 & -497,526 & -9,1122 \\ -0,8578 & 25,7341 & -497,526 & 394,2546 & -218,222 \\ -0,01571 & -0,47132 & -9,1122 & -218,222 & 537,0648 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

$$C_{Y_2} = \begin{pmatrix} 0,261487 & -0,42887 & -0,01791 & -0,00096 & -1,8E - 05 \\ -0,42887 & 0,923185 & -0,53728 & -0,02883 & -0,00053 \\ -0,01791 & -0,53728 & 3,401675 & -0,55735 & -0,01021 \\ -0,00096 & -0,02883 & -0,55735 & 0,441658 & -0,24446 \\ -1,8E - 05 & -0,00053 & -0,01021 & -0,24446 & 0,601639 \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

$$C_{Y_3} = \begin{pmatrix} 2,024885 & -3,32101 & -0,13869 & -0,00744 & -0,00014 \\ -3,32101 & 7,148887 & -4,16057 & -0,22324 & -0,00409 \\ -0,13869 & -4,16057 & 26,34163 & -4,31594 & -0,07905 \\ -0,00744 & -0,22324 & -4,31594 & 3,420076 & -1,89303 \\ -0,00014 & -0,00409 & -0,07905 & -1,89303 & 4,658924 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

$$C_{Y_4} = \begin{pmatrix} 0,188796 & -0,30964 & -0,01293 & -0,00069 & -1,3E - 05 \\ -0,30964 & 0,666548 & -0,38792 & -0,02081 & -0,00038 \\ -0,01293 & -0,38792 & 2,456041 & -0,40241 & -0,00737 \\ -0,00069 & -0,02081 & -0,40241 & 0,318881 & -0,1765 \\ 1,3E - 05 & -0,00038 & -0,00737 & -0,1765 & 0,434389 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

В приведенных ковариационных матрицах (4.8-4.11) диагональные элементы являются значениями оценок дисперсий коэффициентов в уравнениях регрессии, с помощью которых получены оценки соответствующих среднеквадратических отклонений  $S_m$ :

для уравнения  $\widehat{Y}_1$  (15,27815 28,70713 55,10511 19,85585 23,17466 )

для уравнения  $\widehat{Y}_2$  (0,511358 0,960825 1,844363 0,664573 0,775654 )

для уравнения  $\widehat{Y}_3$  (1,422985 2,67374 5,13241 1,849345 2,158454 )

для уравнения  $\widehat{Y}_4$  (0,434507 0,816424 1,567176 0,564696 0,659082 )

С помощью полученных значений  $S_m$  могут быть рассчитаны доверительные интервалы для оценок коэффициентов регрессионных уравнений при уровне значимости  $\alpha=0,05$  и числе степеней свободы  $k=8$  и t-критерий Стьюдента= 2,306:

$$\hat{b}_k \pm S_e \cdot t_{\text{табл}} \quad (4.12)$$

Для иллюстрации приводятся доверительные интервалы, рассчитанные для коэффициентов  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4$  уравнения  $Y_2 = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4$ :

$$\text{для } b_0 (24,75 \pm 2,3 \cdot 0,51) = [25,923 ; 23,577]$$

для  $b_1 (-12,42 \pm 2,3 * 0,96) = [-14,628 ; -10,212]$

для  $b_2 (-8,47 \pm 2,3 * 1,84) = [-12,702 ; -4,238]$

для  $b_3 (-3,42 \pm 2,3 * 0,66) = [-4,938 ; -1,902]$

для  $b_4 (-3,53 \pm 2,3 * 0,77) = [-1,759 ; -5,301]$

Проведенный анализ показывает значимость всех коэффициентов, следовательно, и самих переменных.

Приведенная модель позволяет дать прогнозную оценку реализации выходной переменной  $Y_i$  для значений переменных, не совпадающих с наблюдаемыми.

В качестве примера возьмем новые значения переменных  $x$  и рассмотрим значения, которые принимают выходные переменные  $Y_t$ .

Зададим новый входной вектор  $X_t = (1, 0,65, 0,25, 0,6, 0,5)$ . Тогда выходной вектор  $Y_t = (656,5869, 10,74377, 69,69472, 8,580188)$ .

Качество сделанного прогноза определяется дисперсиями ошибок прогнозов и размахом доверительного интервала. Оценка дисперсии ошибок прогноза среднего значения выходной переменной определяется равенством (4.13):

$$S_e^2 = S^2 \cdot X_t^T (X^T \cdot X)^{-1} X_t \quad (4.13)$$

Доверительный интервал прогноза математического ожидания фактора  $Y_t$ :

$$\hat{Y}_t \pm t_{\text{табл}}(\alpha, n - k) \cdot S_e \quad (4.14)$$

при заданном уровне значимости  $\alpha$  и числе степеней свободы  $n-k$ , а дисперсия ошибки прогноза индивидуального значения выходного фактора имеет вид:

$$S_e^2 = S^2 \cdot X_t^T (1 + X^T \cdot X)^{-1} X_t \quad (4.15)$$

доверительный интервал имеет вид:

$$\hat{Y}_t \pm t_{\text{табл}}(\alpha, n - k) \cdot S_e \quad (4.16)$$

В качестве примера приводим оценку прогноза математического ожидания индивидуального значения  $Y_{2t}$  (раствороотделения):  $S_e = 0,379$ , доверительный интервал  $(10,74 \pm 0,379 \times 2,306) = (9,869; 11,618)$ .

При новых параметрах вектора  $x$  выходные значения становятся несколько лучше, истинное значение переменной  $Y_2$  накрывается приведенным доверительным интервалом с вероятностью 0,95.

Для выходных параметров  $Y_3$ ,  $Y_4$  можно улучшить рассматриваемую модель путем введения дополнительной переменной  $x_5=x_4^2$ , это наглядно показано на графиках, которые представлены ниже (рисунки 4.5 и 4.6).

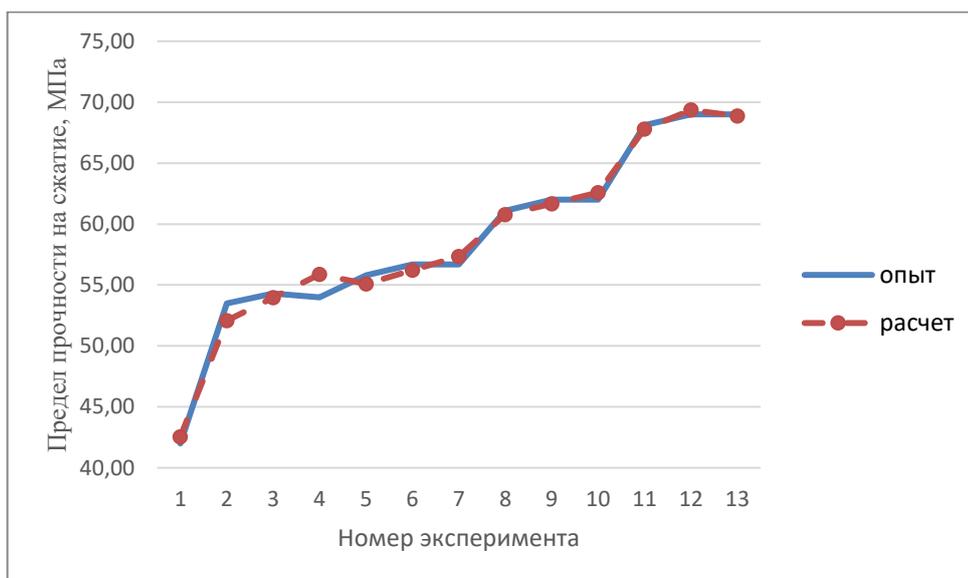


Рисунок 4.5 – Зависимости по параметру «прочность на сжатие» физических экспериментов и модели множественной регрессии с дополнительной переменной

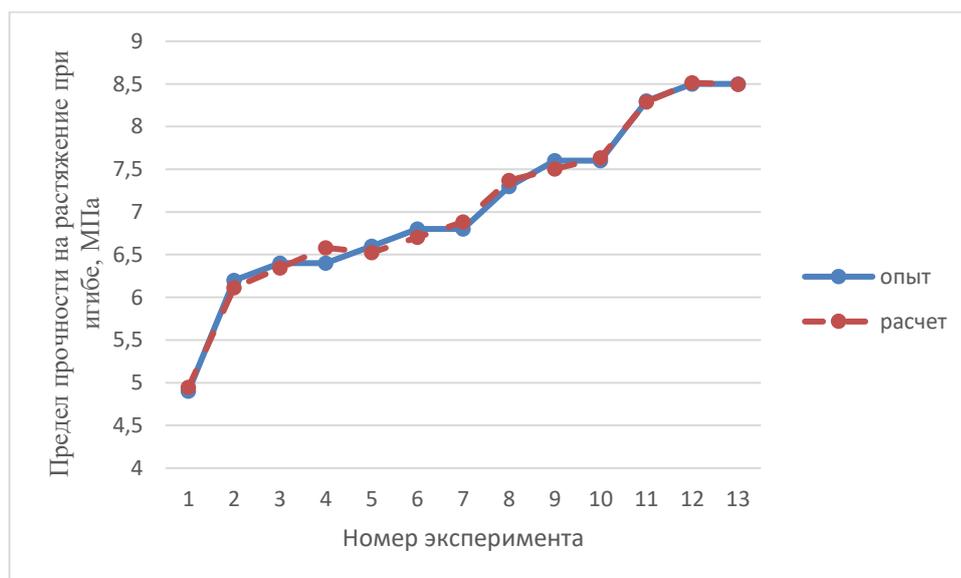


Рисунок 4.6 – Зависимости по параметру «прочность на растяжение при изгибе» физических экспериментов и модели множественной регрессии с дополнительной переменной

Полученные коэффициенты уравнений регрессии имеют вид, представленный в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Коэффициенты уравнений регрессии с дополнительной переменной

Параметр	Коэффициенты					
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
$Y_3$	42,5513	19,03904	11,25482	9,076609	28,05932	-25,3873
$Y_4$	4,94448	2,334406	1,798508	1,329796	3,525109	-3,00989

Коэффициент детерминации  $R^2$  уравнения для  $Y_3$  равен 0,996812, для  $Y_4$  равен 0,993634, значимость уравнений по критерию Фишера составляет 121,1079 и 218,5018 соответственно, что существенно больше табличных значений, значение  $F$  существенно ниже уровня значимости  $\alpha = 0,05$ .

Оценка значимости коэффициентов по критерию Стьюдента при уровне значимости ( $\alpha = 0,05$ ; число степеней свободы 7,  $t$ -критерий = 2,3646) приведена в таблице 4.7

Таблица 4.7 – Значения статистик Стьюдента для уравнений регрессии с дополнительной переменной

Параметр	Значения статистик Стьюдента для коэффициентов					
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
$Y_3$	41,12019	9,791931	3,015487	6,60542	4,807474	-2,85092
$Y_4$	46,79314	11,7576	4,719008	9,477223	5,914684	-3,31008

Данные таблицы 4.7 показывают, что все коэффициенты значимы.

#### 4.2 Использование генеративно-состязательной нейросети для построения регрессионной модели

Для существенного увеличения статистического можно применить возможности генеративно-состязательных нейросетей, которые в процессе обучения позволяют генерировать (моделировать) очень большой объем квазиэкспериментальных данных.

В случае приемлемой близости расчетных и физических значений мы получаем значительный объем статистических данных, позволяющий подбирать

полиномиальные регрессионные уравнения. По результатам анализа уравнений регрессии возникает возможность определения оптимальных значений входных параметров, обеспечивающих наилучшие значения выходных параметров.

Для повышения статистической значимости регрессионных зависимостей при обработке экспериментальных выборок небольшого объема были использованы возможности генеративно-состязательных сетей (GAN).

Для каждого из векторов экспериментальной выборки (таблицы 2.4 и 2.5) было сгенерировано 13 кластеров модельных данных объемом по 200 векторов для каждого кластера. Пример сгенерированных данных для кластера номер 13 приведен в приложении А. Одним из показателей адекватности такой модели может рассматриваться расстояние  $d$  между центроидами сгенерированных кластеров и соответствующими им точками экспериментальных данных в пространстве признаков  $(x_1 - x_4, y_1 - y_4)$ , которое определяли по формуле (4.17):

$$d = \sqrt{\sum (X - \mu)(X - \mu)^T}, \quad (4.17)$$

где  $\mu$  – нормализованный вектор экспериментальных данных, соответствующий данному кластеру,

$X$  – центроид нормализованных модельных векторов кластера.

Результаты вычислений соответствующих расстояний приведены ниже:

$d_1=0,03489$ ;  $d_2=0,02964$ ;  $d_3=0,02057$ ;  $d_4=0,02979$ ;  $d_5=0,02199$ ;  $d_6=0,03614$ ;  
 $d_7=0,03632$ ;  $d_8=0,04365$ ;  $d_9=0,02054$ ;  $d_{10}=0,03452$ ;  $d_{11}=0,03329$ ;  $d_{12}=0,02350$ ;  
 $d_{13}=0,043$ .

Смещение центров кластеров сгенерированных модельных данных относительно соответствующих им экспериментальных точек в пространстве нормализованных (приведенных к единице) признаков не превышает 0,044, что свидетельствует об адекватности статистической модели.

Многokратное расширение корреляционного поля существенно расширяет возможности выбора типа регрессионных моделей с учетом сложности

описываемого явления. В данном случае для уточнения аппроксимации результатов эксперимента была выбрана полиномиальная модель вида (4.18):

$$y = A \cdot x_1^2 + B \cdot x_2^2 + C \cdot x_3^2 + D \cdot x_4^2 + E \cdot x_1 + G \cdot x_2 + H \cdot x_3 + F \cdot x_4 + K \quad (4.18)$$

Значения параметров моделей определялись методом наименьших квадратов с использованием всего массива сгенерированных данных (2600 элементов). Результаты определения оценок параметров приведены в таблицах 4.8 – 4.11.

Таблица 4.8 – Значения оценок параметров полиномиального уравнения регрессии для  $y_1$

Параметры	Значение	Стандартная ошибка	$t$ -статистика ( $t_{кр}^{\alpha=0,01} = 2,578$ )	$P$ -рначение
$K$	350,716	2,132	164,509	$5,200 \cdot 10^{-147}$
$E$	745,420	17,977	41,465	$1,560 \cdot 10^{-74}$
$G$	105,662	7,604	13,895	$4,790 \cdot 10^{-27}$
$H$	28,867	2,692	10,722	$2,210 \cdot 10^{-19}$
$F$	44,569	3,0278	14,720	$5,460 \cdot 10^{-29}$
$D$	-617,966	26,927	-22,950	$1,830 \cdot 10^{-46}$

Таблица 4.9 – Значения оценок параметров полиномиального уравнения регрессии для  $y_2$

Параметры	Значение	Стандартная ошибка	$t$ -статистика ( $t_{кр}^{\alpha=0,01} = 2,578$ )	$P$ -рначение
$K$	25,00617	0,0549	455,598	$5,800 \cdot 10^{-199}$
$E$	-21,677	0,4678	-46,333	$2,720 \cdot 10^{-79}$
$G$	-13,937	0,725	-19,235	$9,490 \cdot 10^{-39}$
$H$	-2,58049	0,080081	-32,2233	$1,620 \cdot 10^{-61}$
$F$	-8,08942	0,289661	-27,9272	$7,790 \cdot 10^{-55}$
$D$	14,92072	0,698447	21,3627	$4,810 \cdot 10^{-43}$
$B$	23,07348	2,560997	9,009572	$3,470 \cdot 10^{-15}$
$A$	6,236561	0,438175	14,23303	$1,090 \cdot 10^{-27}$

Таблица 4.10 – Значения оценок параметров полиномиального уравнения регрессии для  $y_3$

Параметры	Значение	Стандартная ошибка	$t$ -статистика ( $t_{кр}^{\alpha=0,01} = 2,578$ )	$P$ -значение
$K$	42,55811	0,169893	250,5002	$2,6 \cdot 10^{-167}$
$E$	40,24013	1,43782	27,9869	$6,21 \cdot 10^{-55}$
$G$	10,38297	0,611184	16,98827	$6,06 \cdot 10^{-34}$
$H$	15,45864	1,2709	12,16354	$8,81 \cdot 10^{-23}$

Продолжение таблицы 4.10

Параметры	Значение	Стандартная ошибка	$t$ -статистика ( $t_{кр}^{\alpha=0,01} = 2,578$ )	$P$ -значение
$F$	29,48171	0,896543	32,88375	$1,76 \cdot 10^{-62}$
$D$	-33,2197	2,154636	-15,4178	$2 \cdot 10^{-30}$
$C$	-12,1406	1,985785	-6,11376	$1,21 \cdot 10^{-8}$
$A$	-27,3087	1,354339	-20,1639	$1,18 \cdot 10^{-40}$

Таблица 4.11 – Значения оценок параметров полиномиального уравнения регрессии для  $y_4$

Параметры	Значение	Стандартная ошибка	$t$ -статистика ( $t_{кр}^{\alpha=0,01} = 2,578$ )	$P$ -значение
$K$	4,922512	0,022737	216,4965	$1,1 \cdot 10^{-160}$
$E$	4,455264	0,19243	23,15261	$1,16 \cdot 10^{-46}$
$G$	1,705444	0,081134	21,02016	$1,56 \cdot 10^{-42}$
$H$	1,130765	0,029399	38,46225	$2,04 \cdot 10^{-70}$
$F$	3,754787	0,119973	31,29705	$2,01 \cdot 10^{-60}$
$D$	-3,23097	0,288348	-11,2051	$1,63 \cdot 10^{-20}$
$A$	-3,30645	0,181339	-18,2336	$9,07 \cdot 10^{-37}$

Коэффициенты, не указанные в таблицах 4.9 – 4.12, в соответствующих уравнениях регрессии равны нулю.

Как следует из таблиц 4.8 – 4.11, оценки всех параметров полиномиальных уравнений множественной регрессии выходных переменных  $y_1, y_2, y_3, y_4$  значимы, причем не только на уровне значимости 0,05, но и на уровне значимости 0,01. Коэффициент детерминации  $R^2$  для каждого уравнения регрессии выше 0,99, что свидетельствует о высокой адекватности моделей, построенных на сгенерированных данных.

Этот вывод подтверждается графическими представлениями модельных и экспериментальных значений выходных параметров, приведенными на рисунках 4.7 – 4.10.

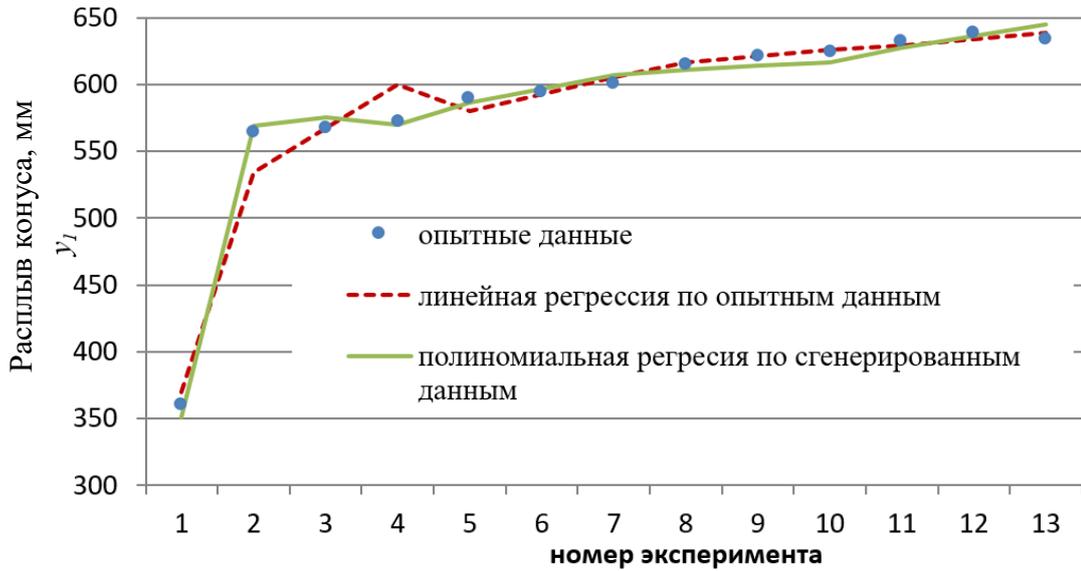


Рисунок 4.7 – Графическое представление экспериментальных и модельных значений параметра  $y_1$

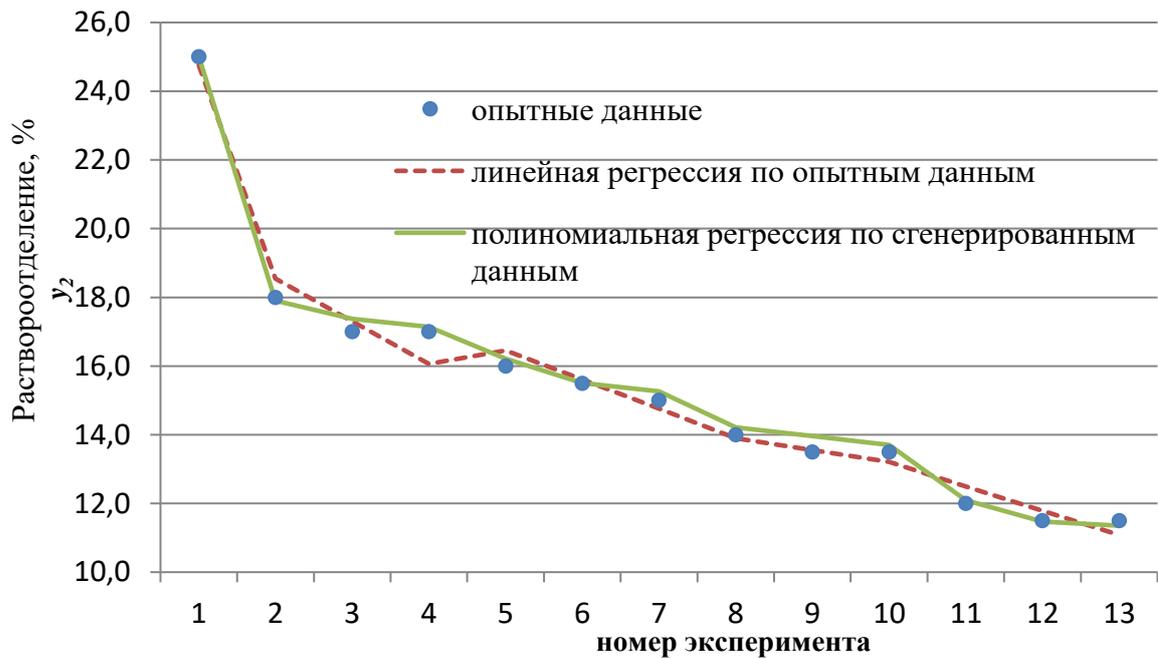


Рисунок 4.8 – Графическое представление экспериментальных и модельных значений параметра  $y_2$

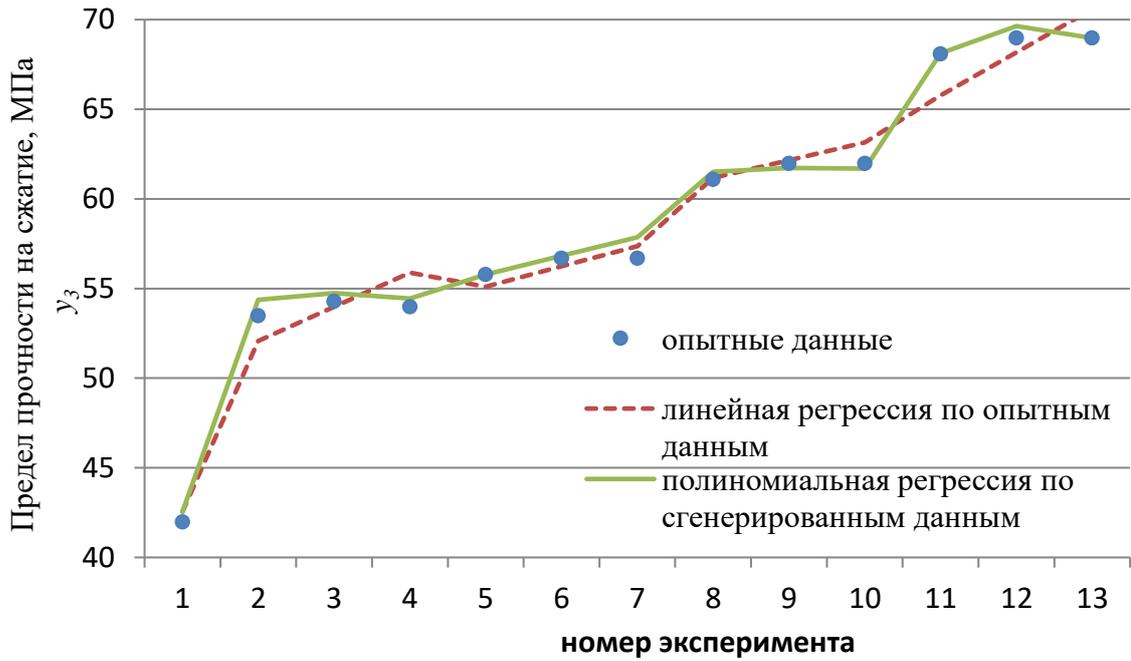


Рисунок 4.9 – Графическое представление экспериментальных и модельных значений параметра  $u_3$

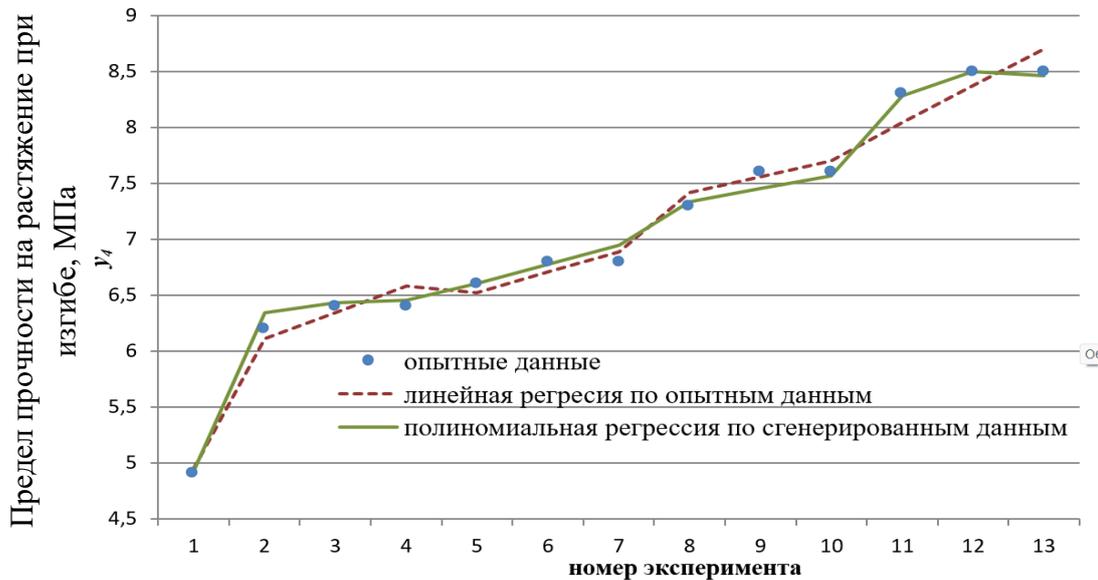


Рисунок 4.10 – Графическое представление экспериментальных и модельных значений параметра  $u_4$

Увеличение объема экспериментальных данных за счет их генерации генеративно-состязательной сетью, обученной на экспериментальной выборке, повышает качество регрессионных моделей за счет расширения возможности выбора вида моделей на стадии их спецификации и увеличения статистической значимости оценок параметров моделей.

Представленные уравнения регрессии позволяют произвести оптимизацию входных переменных. Используя стандартные методы математического анализа, получаем, что переменная  $x_1$  находится в диапазоне (0,60 – 0,72); переменная  $x_2$  принимает значение 0,30;  $x_3$  принимает значение 0,64;  $x_4$  лежит в диапазоне (0,54 – 0,64). Используя данные значения выходных переменных и полиномиальные уравнения регрессии, получим улучшенные значения выходных параметров, представленные в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Оптимизированные значения выходных параметров

Входная переменная	Выходная переменная
$x_1 = 0,66$	$y_1 = 649,98$
$x_2 = 0,30$	$y_2 = 10,84$
$x_3 = 0,64$	$y_3 = 70,57$
$x_4 = 0,59$	$y_4 = 8,76$

Следует отметить, что рассмотренный выше подход можно использовать для получения значений выходных параметров, выбирая переменные, значения которых не встречались в эксперименте для изучения и прогнозирования свойств различных многокомпонентных материалов [133].

### 4.3 Выводы

При помощи математической обработки показано, что на исследуемые выходные параметры влияют в порядке убывания силы воздействия (за исключением влияния первого поликарбоксилатного полимера):

$Y_1$  – параметр «Расплав конуса» – нанодисперсии диоксида кремния и компонент, представленный реакционно-активным поликарбоксилатным полимером (второй полимер);

$Y_2$  – параметр «Растворотделение» – нанодисперсии, второй полимер (оказывает действие микроармирования в результате взаимодействия полимеров в присутствии цемента, как катализатора);

$Y_3, Y_4$  – параметры «Прочность на сжатие» и «Прочность на растяжение при изгибе» – воздействие нанодисперсий, увеличивающих реакционную активность

системы (образование низкоосновных гидросиликатов) и пропилендиамина (создание дополнительных контактов).

Результаты моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментов.

Достигнутая высокая степень соответствия данных, полученных в ходе экспериментов, с выходными параметрами, рассчитанными на модели, позволяет прогнозировать исследуемые выходные параметры при вариации составляющих комплексной химической добавки.

## **5 ИЗГОТОВЛЕНИЕ САМОУПЛОТНЯЮЩЕЙСЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Бетон является одним из основных материалов современной строительной индустрии, в последние десятилетия, в связи с развитием высотного строительства, а также увеличением темпов строительства и производства строительных работ, достаточно широко востребованы самоуплотняющиеся бетоны на основе бетонной смеси повышенной подвижности и связности.

Был произведен выпуск опытно-промышленной партии разработанной комплексной добавки, получена высокоподвижная бетонная смесь повышенной связности, модифицированная данной добавкой и бетон на основе данной смеси на предприятии ООО «НПО «Новые технологии». Произведено сопоставление показателей свойств бетонной смеси опытно-промышленного изготовления (таблица 5.1 и 5.2) с результатами научно-экспериментального исследования, которые показали хорошую сходимость, поэтому целесообразно рекомендовать разработанные составы к промышленному внедрению.

Бетон на основе СУБС опытно-промышленного изготовления обладает высокими показателями качества, которые смогут обеспечить высокую эксплуатационную надежность конструкций, изготовленных из разработанной самоуплотняющейся бетонной смеси.

Статистическая обработка результатов опытно-промышленных исследований по показателю прочности на сжатие бетона показала стабильность проведенных исследований, что подтверждает полученный коэффициент вариации  $V_m = 5,7\%$ .

### **5.1 Определение реологических характеристик СУБС и физико-механических характеристик бетона на ее основе**

Реологические свойства смеси опытно-промышленного изготовления представлены в таблице 5.1.

Физико-механические характеристики бетона на основе СУБС опытно-промышленного изготовления представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.1 – Основные показатели самоуплотняющейся бетонной смеси опытно-промышленного изготовления

Расход цемента на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг	Кол-во разработанной КХД % от массы цемента	Тонкодисперсный наполнитель, % от массы цемента		В/Ц	Расплав конуса, мм	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Вязкость t <sub>500</sub> , с. по ГОСТ Р 59715	Раствороотделение, % по ГОСТ Р 59715	Текущность по методу блокирующего кольца Т4, мм
		известняк	доменный шлак						
460	-	-	-	0,58	360	2279	-	18,0	-
	1,0	-	-	0,39	640	2210	4,0	11,5	5,5
	1,0	10,0	-		680	2230	6,0	7,7	5,0
	1,0	-	10,0		700	2225	5,5	7,5	4,0

Полученные значения физико-механических показателей СУБС соответствуют основным параметрам аналогичных научно-экспериментальных исследований, представленными ранее в таблице 3.1, демонстрируя хорошую сходимость полученных результатов.

Таблица 5.2 – Основные показатели бетона на основе самоуплотняющейся бетонной смеси опытно-промышленной партии

Расход цемента на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг	Кол-во разработанной КХД, % от массы ПЩ	Тонкодисперсный наполнитель, % от массы цемента		Прочность в возрасте 28 суток, МПа					R <sub>tb</sub> /R	усадка, мм/м	Марка по водонепроницаемости	Марка по морозостойкости F <sub>2</sub>
		известняк	доменный шлак	на сжатие	класс бетона	на растяжение при изгибе	класс бетона V <sub>tb</sub>	Приростная, (% от кубиковой)				
460	-	-	-	44	B35	5,2	V <sub>tb</sub> 4,0	31,0 (70,4)	0,116	1,3	W8	200
	1,0	-	-	72	B55	8,9	V <sub>tb</sub> 7,2	59,0 (81,9)	0,129	0,4	W14	400
	1,0	10	-	76,6	B60	9,6	V <sub>tb</sub> 7,7	63,5 (82,9)	0,133	0,3	W14	400
	1,0	-	10	75,6	B 60	9,7	V <sub>tb</sub> 7,8	62,7 (83,0)	0,134	0,3	W14	400

Бетон, созданный с использованием разработанной добавки, показывает увеличение прочности на сжатие на 77% по сравнению с контрольным составом, (класс бетона повышается с В35 до В60). Повышается прочность на растяжение при изгибе (89%), класс бетона по прочности на растяжение при изгибе увеличивается с  $B_{тб}$  4,0 до фактического класса бетона  $B_{тб}$  7,6-7,7. Увеличение данных прочностных показателей хорошо коррелирует с результатами проведенных научно-экспериментальных исследований и находит подтверждение в теоретической части исследования.

Положительные результаты, которые были достигнуты в ходе экспериментов и выпуска партии опытного производства, представленные в акте опытно-промышленных испытаний (приложение Б), явились предпосылками для разработки Стандарта организации на разработанную добавку «Комплексная химическая добавка для бетонов и строительных растворов» СТО 20.59.59-007-985 93931-2023, который представлен в приложении В. Разработан технологический регламент производства СУБС, в соответствии с которым даны рекомендации по использованию наиболее эффективного оборудования.

## **5.2 Технологическая схема производства комплексной химической добавки и ее изготовление для самоуплотняющейся бетонной смеси в присутствии тонкодисперсных наполнителей**

Разработана схема приготовления комплексной химической добавки, которая заключается в следующем.

1. Дозируют водный раствор пропилендиамина с  $\rho = 1,005 \text{ г/см}^3$  и  $\text{pH} = 9,0 \pm 0,5$ .
2. Дозируют водный раствор золя кремниевой кислоты с плотностью  $\rho = 1,023 \text{ г/см}^3$  и  $\text{pH} = 4,0$ , содержащий нанодисперсии диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ .
3. Компоненты, отдозированные по п.1 и п.2 транспортируют в лопастную мешалку, где осуществляют их тщательное перемешивание в течение 15 минут.

4. Дозируют водный раствор поликарбоксилатного полимера этилового эфира метакриловой кислоты с  $\rho = 1,027 \text{ г/см}^3$  и величиной водородного показателя  $\text{pH} = 6,0 \pm 0,5$ .

5. Компонент, отдозированный по п.4 транспортируют в лопастную мешалку, добавляя к смеси, приготовленной по п.3 и все тщательно перемешивают в течение 15 минут.

6. Дозируют водный раствор поликарбоксилатного полимера ангидрида малеиновой кислоты с  $\rho = 1,029 \text{ г/см}^3$  и  $\text{pH} = 6,0 \pm 0,5$ .

7. Компонент, отдозированный по п.6 транспортируют в лопастную мешалку, добавляя к смеси, приготовленной по п.5 и все тщательно перемешивают в течение 15 минут до получения однородного раствора с плотностью  $\rho = 1,020 \pm 0,002 \text{ г/см}^3$  и  $\text{pH} = 6,5 \pm 0,5$ .

8. Готовый раствор КХД транспортируют в накопительную емкость.

Добавку рекомендуется хранить в закрытой таре, при температуре не ниже 0 градусов по Цельсию, исключая попадание атмосферных осадков. Гарантийный срок хранения - 12 месяцев.

Приготовление самоуплотняющихся бетонных смесей целесообразно производить в смесителях принудительного действия.

Целесообразно вводить компоненты СУБ смесей в следующей последовательности:

- на первом этапе вводится часть крупного заполнителя совместно с цементом и тонкодисперсным наполнителем;

- после этого добавляется основная часть отдозированной воды с комплексной химической добавкой ( $\approx 70\%$ ) от общего количества воды, все тщательно перемешивается.

- в приготовленную бетонную смесь добавляется песок, оставшийся щебень и оставшаяся часть воды совместно с КХД.

- продолжительность перемешивания составляет 90-100 секунд.

- транспортирование СУБС должно осуществляться в специальных автомиксерах, с постоянным вращением бочки миксера.

- время транспортирования не должно превышать 1,5 – 2 часа, в автобетоносмесителях с пониженной скоростью перемешивания, с постоянным вращением бочки миксера.

- не допускается добавлять воду в бочку автомиксера.

Опытно-промышленные испытания СУБ осуществляли на ООО «НПО «Новые технологии», которое является индустриальным партнером ФГБОУ ВО ПГУПС. Все физико-механические испытания СУБС и бетона на ее основе осуществили в испытательной лаборатории аккредитованного АНИТЦ «СОКРАТ» на поверенном оборудовании.

### 5.3 Выводы

Произведён выпуск опытно-промышленной партии разработанной комплексной химической добавки и СУБС с ее использованием. Результаты опытно-промышленных исследований подтвердили научно-экспериментальные результаты, установлено что самоуплотняющаяся бетонная смесь при высоких показателях подвижности (расплыв конуса 68-70 см) обладает повышенной связностью (показатель раствороотделения составляет 7,7-7,5%, верхняя граница данного показателя, регламентируемая ГОСТ Р 59714, составляет 17,5% (при достигнутой марке бетонной смеси по удобоукладываемости РК2).

Показатели прочности самоуплотняющегося бетона опытно-промышленного изготовления соответствуют показателям экспериментальных исследований.

Проведенные расчеты по фактическим физико-механическим показателям материала показали, что бетон на основе разработанной самоуплотняющейся бетонной смеси обеспечивает возможность уменьшения толщины конструкций (на 13%) или уменьшения степени армирования конструкций (на 7%). Положительные результаты стали основанием для разработки и формирования стандарта организации на разработанную комплексную химическую добавку.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного диссертационного исследования были получены следующие результаты:

1. Установлено, что для создания эффективной комплексной химической добавки целесообразно использовать поликаркарбоксилатные полимеры разной структуры в сочетании с нанодисперсиями диоксида кремния и пропилендиамином, которые обладают хорошей совместимостью, дополнительно усиливая эффективность действия каждого компонента и обеспечивая эффект суперпластифицирующего и стабилизирующего действия, повышают прочность на сжатие и на растяжение при изгибе, морозостойкость и водонепроницаемость бетона.

2. Определено, что бетонная смесь, модифицированная разработанной комплексной химической добавкой, при добавлении тонкодисперсных наполнителей различного происхождения обладает более высокой подвижностью и связностью, обеспечивая создание бетонной смеси марки по удобоукладываемости РК2 (расплав конуса 66 - 75 см) с растворомотделением, равным 7,5%, при его нормативной величине не более 17,5%; текучесть самоуплотняющейся бетонной смеси соответствует марке Т4.

Бетон на основе разработанной СУБС с КХД обладает повышенным (на 72%) показателем прочности на сжатие при увеличенной (на 78%) прочности на растяжение при изгибе; рост призмной прочности составляет 50% относительно контрольного состава и достигает 83% от величины прочности при сжатии (при значении 71% у контрольного состава). Морозостойкость модифицированного бетона соответствует марке F<sub>2400</sub>, водонепроницаемость – марке W14.

3. Подтверждено результатами рентгенофазового анализа, инфракрасной спектроскопии и дифференциально-термического анализа, что нанодисперсии диоксида кремния SiO<sub>2</sub> обладают повышенной реакционной активностью, вступая в химическое взаимодействие с первоначально образованными гидратными фазами, такими как портландит Ca(OH)<sub>2</sub> и тоберморитоподобный гидросиликат кальция CSH(I), уменьшая содержание Ca(OH)<sub>2</sub> в бетонной смеси и дополнительно образуя гидросиликаты типа CSH(I), а также в результате химического взаимодействия с первоначально образованными гидратными фазами образуются гидросиликаты повышенной твердости и

прочности, отличающиеся волокнистой структурой, такие как афвиллит  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  и окенит  $3\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .

ИК-спектроскопическими исследованиями установлено, что поликарбоксилатные полимеры вступают в химическое взаимодействие друг с другом, оказывая упрочняющее действие на формирующуюся микроструктуру цемента, а также подтверждено образование связей между катионами тонкодисперсных наполнителей и компонентом комплексной химической добавки – пропилендиамином.

4. Проведенная математическая обработка подтвердила значимость действия комплекса выбранных компонентов добавки. Установлено, что наибольшее влияние на удобоукладываемость самоуплотняющейся бетонной смеси оказывают поликарбоксилатные полимеры; на раствороотделение – все компоненты комплексной химической добавки примерно в одинаковой степени; на прочность бетона – нанодисперсии  $\text{SiO}_2$  и пропилендиамин. Использование генеративно-состязательной нейросети позволила использовать для анализа уравнения более высоких степеней и решить задачи оптимизации.

5. Произведен выпуск опытно-промышленной партии разработанной комплексной химической добавки и модифицированной самоуплотняющейся бетонной смеси, которая соответствует марке по удобоукладываемости РК2. Сравнение результатов проведенных опытно-промышленных исследований самоуплотняющейся бетонной смеси с комплексной химической добавкой и бетона на ее основе показывают хорошую сходимость с результатами научных экспериментов, что явилось основанием для разработки стандарта организации «Комплексная химическая добавка для бетонов и строительных растворов».

**Рекомендации:** разработанную комплексную химическую добавку рекомендуется использовать для производства самоуплотняющихся бетонных смесей для ответственных конструкций на строительных объектах различного назначения. Модифицированные бетоны на основе разработанной самоуплотняющейся бетонной смеси относятся к бетонам с высокими показателями прочности, морозостойкости и водонепроницаемости, и могут быть рекомендованы к широкому применению на следующих объектах: для высотного домостроения, для густоармированных конструкций, в мостостроении и в транспортном строительстве.

**Перспективы дальнейших исследований** состоят в повышении эффективности действия комплексной химической добавки с целью получения самоуплотняющейся бетонной смеси большей текучести, пониженной вязкости при сохранении высокого уровня связности, и создании бетона на ее основе, обладающего повышенной прочностью на растяжение при изгибе, а также в исследовании и увеличении срока сохраняемости свойств СУБС, а также разработке составов легких самоуплотняющихся бетонов с маркой по средней плотности до D1800.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Раев, А. С. Влияние вида цемента на сохраняемость свойств самоуплотняющихся бетонов / А. С. Раев, Л. И. Касторных // Молодой исследователь Дона. 2017. №4(7). С. 9-16.
2. Авксентьев, В.И. Шлам химической водоочистки – эффективный наполнитель в самоуплотняющихся песчаных бетонах / В.И. Авксентьев, Н.М. Морозов, В.Г. Хозин // Известия КГАСУ. – 2014. – № 4 (30). – С. 249–254.
3. Синтез нанодисперсного модификатора на основе SiO<sub>2</sub> для цементных композитов / О.В. Артамонова, О.Р. Сергуткина., И.В. Останкова, М.А. Шведова // Конденсированные среды и межфазные границы. 2014. Т. 16., №2. С. 152-162.
4. Золь-гель синтез наноразмерных частиц SiO<sub>2</sub> для модифицирования структуры цементного камня / О.В. Артамонова, О.Р. Сергуткина, Д.Н. Коротких, Е.М. Чернышов // Нанотехнологии в строительстве. – 2010. – Т. 2, № 1. – С. 9–17. [Электронный ресурс] URL: [http://nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild\\_1\\_2010.pdf](http://nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild_1_2010.pdf) (дата обращения: 12.05.2021).
5. Артамонова, О.В. Строительные наноматериалы: тенденции развития и перспективы / О.В. Артамонова, О.Р. Сергуткина // Научный Вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 6. – С. 13–23.
6. Артамонова, О.В. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Часть 1: Общие проблемы фундаментальности, основные направления исследований и разработок / О.В. Артамонова, Е.М. Чернышов // Строительные материалы. – 2013. – № 9. – С. 82–95.
7. Эффективная минеральная добавка на основе отходов нефтехимических производств для бетонной строительной смеси / А.Д. Бадикова, С.Р. Сахибгареев, Р.А. Федина и др. // Нанотехнологии в строительстве. – 2020. – Т. 12, № 1. – С. 34–40. [Электронный ресурс] URL: [http://nanobuild.ru/ru\\_RU/journal/Nanobuild-1-2020/34-40.pdf](http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-1-2020/34-40.pdf) (дата обращения: 12.05.2021).

8. Высококачественные самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов сжигания угля / Ю.М. Баженов, В.В. Воронин, Л.А. Алимов и др. // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12, № 12 (111). – С. 1385–1391.

9. Баженов, Ю.М. Исследование наномодифицированного мелкозернистого бетона / Ю.М. Баженов, Н.П. Лукутцева, Е.Г. Матвеева // Вестник МГСУ. – 2010. – № 4. – С. 415–420.

10. Баженов, Ю.М. Исследования влияния наномодифицирующей добавки на прочностные и структурные параметры мелкозернистого бетона / Ю.М. Баженов, Н.П. Лукутцева, Е.Г. Матвеева // Вестник МГСУ. – 2010. – № 2. – С. 215–218.

11. Баженов, Ю.М. Наноматериалы и нанотехнологии в современной технологии бетонов / Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман, Б.И. Булгаков // Вестник МГСУ. – 2012. – № 12. – С. 125–133.

12. Барабанщиков, Ю.Г. Суперпластификатор С-3 и его влияние на технологические свойства бетонных смесей / Ю.Г. Барабанщиков, М.В. Комаринский // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 6 (21). – С. 58–69.

13. Беленцов, Ю.А. Самоуплотняющийся бетон с использованием наполнителя из молотого известняка / Ю.А. Беленцов, О.М. Смирнова, Д.Д. Шаманина // Материалы II Брянского международного инновационного форума. – Брянск: Брянская государственная инженерно-технологическая академия, 2016. – С. 22–25.

14. Богданов, Р.Р. Оптимизация фракционного состава смеси заполнителей для самоуплотняющегося бетона / Р.Р. Богданов, Р.А. Ибрагимов, Е.В. Королев // Известия КГАСУ. – 2019. – № 4 (50). – С. 327–335.

15. Болотских, О.Н. Самоуплотняющийся бетон и его диагностика / О.Н. Болотских // Технологии бетонов. – 2008. – № 10. – С. 28–31.

16. Величко, Е.Г. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона / Е.Г. Величко, Ю.С. Шумилина // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15, № 2. – С. 235–243.

17. Вовк, А.И. Добавки на основе отечественных поликарбоксилатов / А.И. Вовк // Журнал Технологии бетонов. – 2013. – № 4. – С. 13–15. [Электронный

ресурс] URL: <http://tehnobeton.ru/pdf/2013-04/13-15.pdf> (дата обращения: 12.05.2021).

18. Возможность использования доменных шлаков в производстве бетонов и растворов во Вьетнаме / Ву Ким Зиен, Танг Ван Лам, С.И. Баженова, Зуен Фонг Нгуен // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 11. – С. 17–24.

19. Гайнутдинов, М.М. Сравнение свойств самоуплотняющихся бетонов на крупном и мелком заполнителях / М.М. Гайнутдинов, Н.М. Красиникова // Инновационная наука. – 2018. – № 7-8. – С. 177–180.

20. Гинзбург, А.В. Обеспечение высокого качества и эффективности работ при возведении тоннелей из монолитного бетона / А.В. Гинзбург // Вестник МГСУ. – 2014. – № 1. – С. 98–110.

21. Режим перемешивания компонентов при изготовлении бетона с добавкой золы уноса / В. И. Голик, Ю. В. Дмитрак, М. В. Хмелевский, П. П. Стась // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2019. – Вып. 1. – С. 201-210.

22. Гончикова, Е.В. Наномодифицирование цементного камня введением многокомпонентного золя / Е.В. Гончикова, Н.В. Архинчева // Строительные материалы. – 2011. – № 9. – С. 68–69.

23. Давидюк, А.Н. О критериях эффективности бетонов для высотного строительства / А.Н. Давидюк, Г.В. Несветаев // Строительные материалы. – 2010. – № 4. – С. 85–87.

24. Влияние поликарбонатных суперпластификаторов на структурообразование цементных паст / Л.М. Добшиц, О.В. Кононова, С.Н. Анисимов, А.Ю. Лешканов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5. – С. 945–948.

25. Влияние содержания микрокремнезема на повышение прочности реакционно-порошковых бетонов / Р.А. Дрянин, Г.П. Сехпосян, С.В. Ананьев, В.И. Калашников // Молодой ученый. – 2014. – № 13 (72). – С. 44–47. [Электронный ресурс] URL: <https://moluch.ru/archive/72/12362/> (дата обращения: 10.05.2021).

26. Композиционный портландцемент с гибридной минеральной добавкой на основе метакаолина и известняка / Е.Г. Ермилова, З.А. Камалова, Р.З. Рахимов, О.В. Стоянов // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 8. – С. 98–101.

27. Замчалин, М. Н. Исследование влияния добавки бентонита на свойства раствора на основе композиционного цемента / М. Н. Замчалин, М. О. Коровкин, Н. А. Ерошкина // Молодой учёный. – 2015. – № 13 (93). – С. 112-115.

28. Иванов, И.М. Математическая модель для назначения высокоэффективного состава бетона с использованием молотого гранулированного доменного шлака / И.М. Иванов, Л.Я. Крамар // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 28-41.

29. Касторных, Л.И. Влияние отсева камнедробления и минерального наполнителя на характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов / Л.И. Касторных, А.Г. Тароян, Л.М. Усепян // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3. [Электронный ресурс] URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4340](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4340) (дата обращения: 12.05.2021).

30. Касторных, Л.И. Об эффективности использования модификатора вязкости в самоуплотняющихся бетонах / Л.И. Касторных, В.П. Скиба, А.Е. Елсуфьев // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3. [Электронный ресурс] URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4346/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4346/) (дата обращения: 10.05.2021).

31. Эффективность применения доменного гранулированного шлака в бетонах с добавкой на основе поликарбонатного эфира / О.В. Кононова, С.Н. Анисимов, А.О. Смирнов, А.Ю. Лешканов // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 6-2. – С. 259-263; [Электронный ресурс] URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=36017> (дата обращения: 11.05.2021).

32. Кононова, О.В. Исследование особенностей формирования прочности квазисамоуплотняющегося бетона с микрокремнеземом / О.В. Кононова, А.О. Смирнов // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 9-2. – С. 327-331; [Электронный ресурс] URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41749> (дата обращения: 10.05.2021).

33. Коровкин, М.О. Исследование самоуплотняющегося бетона для производства железобетонных изделий на универсальном стенде с переставной опалубкой / М.О. Коровкин, Д.М. Гринцов, Н.А. Ерошкина // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3. [Электронный ресурс] URL:

[http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_37\\_korovkin\\_grintsov\\_eroshkina-.pdf\\_7b5f003cc2.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_37_korovkin_grintsov_eroshkina-.pdf_7b5f003cc2.pdf) (дата обращения: 08.05.2021).

34. Коротких, Д.Н. О требованиях к наномодифицирующим добавкам для высокопрочных цементных бетонов / Д.Н. Коротких, О.В. Артамонова, Е.М. Чернышов // Нанотехнологии в строительстве. – 2009. – Т. 1, № 2. – С. 42-49. [Электронный ресурс] URL: [http://nanobuild.ru/ru\\_RU/journal/Nanobuild\\_2\\_2009\\_RUS.pdf](http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_2_2009_RUS.pdf) (дата обращения: 12.05.2021).

35. Литые бетоны с использованием отходов медеплавильного производства и нанокремнезема / А.В. Кравцов, С.В. Цыбакин, Т.М. Евсеева, К.Г. и др. // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12, № 9 (108). – С. 1010–1018.

36. Свойства материалов на основе портландцемента с добавкой метакаолина МКЖЛ / С.А. Краснобаева, И.Н. Медведева, А.С. Брыков, З.В. Стафеева // Цемент и его применение – 2015. – № 1. – С. 50-55.

37. Кузнецов, Д.В. Влияние молотого доменного гранулированного шлака ПАО «Северсталь» на прочность бетона / Д.В. Кузнецов, Н.Н. Калиновская, Аль-Мусави Кадим Салех // Технологии бетонов – 2021. – № 2 (175). – С. 33-36.

38. Малахин, С.С. Влияние дисперсности шлака на свойства портландцемента / С.С. Малахин, Ю.Р. Кривобородов // Успехи в химии и химической технологии. – 2018. – Т. 32, № 2. – С. 114-116.

39. Разработка составов и исследование свойств самоуплотняющихся бетонов на рядовых материалах Челябинской области / Д.В. Матвеев, И.М. Иванов, Т.Н. Черных, Л.Я. Крамар // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 55–59.

40. Мозгалёв, К.М. Самоуплотняющиеся бетоны: возможности применения и свойства / К.М. Мозгалёв, С.Г. Головнев // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2011. – № 4. – С. 70–74.

41. Молчанов, А.О. Некоторые свойства золы уноса как компонента бетонных изделий / А.О. Молчанов, В.В. Нелюбова, Н.О. Кузьмина // Труды КНЦ РАН. – 2017. – № 5 (8). – С. 102–106.

42. Морозов, Н.М. Влияние метакаолина на свойства цементных систем / Н.М. Морозов, И.В. Боровских // Известия КГАСУ. – 2015. – № 3 (33). – С. 127-132.

43. Морозов, Н.М. Роль суперпластифицирующих добавок в формировании прочности самоуплотняющегося бетона / Н.М. Морозов, А.Ф. Галеев // Известия КГАСУ. – 2016. – № 4 (38). – С. 376-381.

44. Исследование эксплуатационных свойств самоуплотняющихся песчаных бетонов / Н.М. Морозов, В.Г. Хозин, В.И. Авксентьев, И.В. Боровских // Известия КГАСУ. – 2016. – № 3 (37). – С. 211-216.

45. Выбор суперпластификатора для высокопрочного песчаного бетона / Н.М. Морозов, В.Г. Хозин, Х.Г. Мугинов, Н.Э. Гайфуллин // Строительный комплекс России. Наука. Образование. Практика: материалы международной научно-практической конференции. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2012. – С. 188-190.

46. Разработка составов самоуплотняющегося бетона на основе бетонного лома с использованием структурных характеристик / В.В. Наруть, О.А. Ларсен, С.В. Самченко и др. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 4. – С. 8-16.

47. Несветаев, Г.В. Некоторые вопросы применения добавок для бетонов / Г.В. Несветаев // Бетон и железобетон. – 2011. – № 2. – С. 78–80

48. Несветаев, Г.В. Проектирование макроструктуры самоуплотняющейся бетонной смеси и её растворной составляющей / Г.В. Несветаев, Ю.Ю. Лопатина // Научно-ведение. – 2015. – Т. 7, № 5. [Электронный ресурс] URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/48TVN515.pdf> (дата обращения: 12.05.2021).

49. Оптимизация составов многокомпонентных мелкозернистых фибробетонов, модифицированных на различных масштабных уровнях / Т.А. Низина, В.П. Селяев, А.С. Балыков и др. // Нанотехнологии в строительстве. – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 43–65.

50. Оучи, М. Самоуплотняющиеся бетоны: разработка, применение и ключевые технологии / М. Оучи // Труды 1-ой Всероссийской конференции по бетону и железобетону «Бетон на рубеже третьего тысячелетия». – Москва: 2001. – С. 209-215.

51. Влияние наноструктурирующих компонентов на характеристики цементного камня и свойства высокопрочных и термостойких бетонов / В.Т.

Перцев, Н.С. Перова, А.А. Леденев, Т.В. Загоруйко // Известия КГАСУ. – 2019. – № 3 (49). – С. 163-171.

52. Полонина, Е.Н. Физико-механические характеристики нанобетона / Е.Н. Полонина, С.Н. Леонович, Е.А. Коледа // Вестник инженерной школы. – 2018. – № 4 (37). – С. 100-109.

53. Влияние кварцевой муки на технологические свойства самоуплотняющихся бетонных смесей / А.П. Пустовгар, И.С. Иванова, А.А. Еленова и др. // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, № 6 (117). – С. 717–728.

54. Нанодобавки из кремне- и железосодержащего (III) золя для тяжелого бетона на рядовых цементах / Л.Б. Сватовская, В.Я. Соловьева, И.В. Степанова, Д.С. Старчуков // Нанотехнологии в строительстве. – 2010. – Т. 2, № 5. – С. 61–68. [Электронный ресурс] URL: [http://nanobuild.ru/ru\\_RU/journal/Nanobuild\\_5\\_2010\\_RUS.pdf](http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_5_2010_RUS.pdf) (дата обращения: 12.05.2021).

55. Сватовская, Л.Б. Управление свойствами композиционных материалов на неорганическом вяжущем с добавками наноразмера / Л.Б. Сватовская, В.А. Чернаков, И.В. Степанова // [Электронный ресурс] URL: <http://ntsr.info/science/library/2906.htm> (дата обращения: 13.12.2023).

56. Смирнова, О.М. Расход и дисперсность молотого известняка для самоуплотняющегося бетона / О.М. Смирнова, О.Е. Макаревич // Цемент и его применение. – 2014. – № 4. – С. 76-78.

57. Соловьев, А.К. Самоуплотняющийся бетон в архитектурных конструкциях / А.К. Соловьев, К.А. Соловьев, Н.В. Стекольников // Architecture and Modern Information Technologies. – 2018. – № 2(43). – С. 171-184 [Электронный ресурс] URL: [http://marhi.ru/AMIT/2018/2kvart18/11\\_solovev\\_stekolnikov/index.php](http://marhi.ru/AMIT/2018/2kvart18/11_solovev_stekolnikov/index.php) (дата обращения: 12.05.2021).

58. Оценка эффективности применения поликарбоксилатных суперпластификаторов для производства бетона / В.Н. Тарасов, Б.В. Гусев, С.Ю. Петрунин и др. // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2018. – Т. 4, № 1. – С. 1-12 [Электронный ресурс] URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2018/01/2018-N1-Tarasov-Garnovesov.pdf> (дата обращения: 12.05.2021).

59. Толчков, Ю.Н. Модифицирование композитов строительного назначения углеродными наноструктурами / Ю.Н. Толчков, З.А. Михалева, А.Г. Ткачев // Вестник ТГТУ. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 161–172.

60. Влияние поверхностно-активных веществ на распределение углеродных наноматериалов в водных дисперсиях при наномодифицировании строительных композитов / Ю.Н. Толчков, Т.И. Панина, З.А. Михалева и др. // Химическая физика и мезоскопия. – 2017. – Т. 19, № 2. – С. 292-298.

61. Устименко, М.Б. Самоуплотняющийся бетон / М.Б. Устименко, А.С. Михайлов, Д.А. Шрайбер // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплекса: материалы национальной научно-практической конференции 2019 – Вып. 19 – С. 455-459.

62. Отечественный опыт производства и применения самоуплотняющегося бетона / В.Р. Фаликман, В.В. Денискин, О.О. Калашников, В.Ю. Сорокин // Национальная ассоциация ученых (НАУ) / Технические науки — 2015 — № 7 — С. 68–73.

63. Самоуплотняющиеся бетоны с применением отходов растениеводства / Р.С. Федюк, А.В. Мочалов, Д.Н. Пезин, Р.А. Тимохин // Вестник СибАДИ. – 2018. – Т. 15, № 2 (60).

64. Феррари, Г. Самоуплотняющийся бетон для моста "Калатрава" в Венеции / Г. Феррари, Ф. Сурико // Бетон и железобетон. – 2006. – № 3. – С. 28-29.

65. Влияние различных глинистых частиц на эффективность поликарбоксилатного суперпластификатора и свойства цементного камня / А.А. Хицков, И.М. Иванов, Л.Я. Крамар и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура». – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 40-51.

66. Структурная модификация новообразований в цементной матрице с использованием дисперсии углеродных нанотрубок и нанокремнезема / Б.М. Хрусталева, С.Н. Леонович, Г.И. Яковлев и др. // Наука и техника. – 2017 – Т. 16., № 2.

67. Туан, Ми Чан. Самоуплотняющиеся бетонные смеси для дорожного строительства / Чан Туан Ми, В.ф Коровяков // Вестник МГСУ. – 2012 – № 3 – С. 131–137.

68. Чернышов, Е. М. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Часть 3. Эффективное наномодифицирование систем твердения цемента и структуры цементного камня (критерии и условия) / Е. М. Чернышов, О. В. Артамонова // Строительные материалы. – 2015. – № 10. – С. 54–63.

69. Чернышов, Е.М. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Часть 2: К проблеме концептуальных моделей наномодифицирования структуры / Е.М. Чернышов, О.В. Артамонова, Г.С. Славчева // Строительные материалы. – 2014. – № 4. – С. 73–84.

70. Alonso, M.M. Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes / M.M. Alonso // Cement and Concrete Composites. – 2013. – № 35. – P. 151–162.

71. Beeralingegowda, B., Gundakall, V.D. The effect of limestone powder on the properties of self-compact concrete / B. Beeralingegowda, V.D. Gundakall // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 2, № 9. [Электронный ресурс] URL: [http://www.ijirset.com/upload/september/75\\_THE%20EFFECT.pdf](http://www.ijirset.com/upload/september/75_THE%20EFFECT.pdf) (дата обращения: 10.05.2021).

72. Cazacu, N., Bradu, A., Florea, N. Self-compacting concrete in building industry / N. Cazacu, A. Bradu, N. Florea // Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy. – 2016. – Vol. 62 (66), No. 1. – P. 85-94.

73. Mix design of self-compacting concrete with limestone filler versus fly ash addition / A. Cosa, B. Heghes, C. Negrutiu, Z. Kiss // Procedia Manufacturing. – 2018 – № 22 – P. 301-308.

74. Dr. Khan, R. A. Mechanical and Durability Performance of Self Compacting Concrete Containing Fly Ash and Metakaolin / Dr. Rizwan. A. Khan // Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies. – 2017. – Vol. 2, № 1. – P. 68-78.

75. Holmberg, L. Новые суперпластификаторы на основе поликарбоксилата. Доклад на конференции BALTIMIX-2006 / L. Holmberg, M. Hansson, J. Engstrand. [Электронный ресурс] URL: [https://baltimix.ru/confer\\_archive/reports/doclad06/sika.php](https://baltimix.ru/confer_archive/reports/doclad06/sika.php) (дата обращения: 08.05.2021).

76. Janowska-Renkas, E. The influence of the chemical structure of polycarboxylic superplasticizers on their effectiveness in cement pastes / E. Janowska-Renkas // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 108. – P. 575–583.

77. . Effect of bentonite on fresh and hardened property of self compacting concrete / Muhammad Ali Musarat, Sanaullah, Sikandar Hayat Khan, Kifayat Ullah. [Электронный ресурс] URL: [https://www.researchgate.net/publication/335390101\\_EFFECT\\_OF\\_BENTONITE\\_ON\\_FRESH\\_AND\\_HARDENED\\_PROPERTY\\_OF\\_SELF\\_COMPACTING\\_CONCRETE](https://www.researchgate.net/publication/335390101_EFFECT_OF_BENTONITE_ON_FRESH_AND_HARDENED_PROPERTY_OF_SELF_COMPACTING_CONCRETE) (дата обращения: 11.05.2021).

78. Influence of metacaolin in fresh and hardened properties of self compacting concrete / N. Krishna Murthy, N. Aruna, A.V.Narasimha Rao et al. // *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*. – 2013. – Vol. 4 №3. – P. 223-239.

79. Silva, P. Experimental study of the mechanical properties and shrinkage of self-compacting concrete with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler / P. Silva, J. de Brito // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2016. – Vol. 86. – P. 1-24.

80. Performance of reinforced concrete beams cast with different percentages of GGBS replacement to cement / Rami A. Hawileh, Jamal A. Abdalla, Fakherdine Fardmanesh et al. // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 17, № 3. P. 511-519.

81. Khan, Rizwan A. Durability Properties of Self Compacting Concrete containing Fly ash, Lime powder and Metakaolin / Rizwan A. Khan, Atul Sharma. // *Journal of Materials and Engineering Structures*. 2015. № 2. P. 206–212.

82. Kumar, Sanjeev. Effects of Metakaolin Content on Fresh and Hardened Properties of Self Compacted Concrete / Sanjeev Kumar, Rinku Saini // *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*. Vol. 5 №8 P. 30-36.

83. Samad, Shahab. Strength development characteristics of concrete produced with blended cement using ground granulated blast furnace slag (GGBS) under various curing conditions / Shahab Samad, Attaullah Shah, Mukesh Limbachiya. // *Sadhana*. 2017. № 42(7). P. 1203–1213.

84. Particle Size Effect of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Cement Concrete / V.Nagendra, C. Sashidhar, S.M. Prasanna Kumar, N.Venkata Ramana // International Journal of Recent Trends in Engineering & Research (IJRTER). 2016. Vol. 2, № 8. P. 6-10..

85. Коротких, Д.Н. Технология бетонирования внутренней защитной оболочки реакторного здания Белорусской АЭС / Кулинич Ю.И., Паникин Д.А. // Строительные материалы. 2016. № 5. С. 10-15.

86. Болотских, О.Н. Самоуплотняющийся бетон и его диагностика // Технологии бетонов. 2008. № 10. С. 28-31.

87. Brouwers, H.J.H. Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study / H.J.H. Brouwers, H.J. Radix // Cement and Concrete Research. 2005. Vol. 35. № 11. P. 2116-2136.

88. Collepari, M. Innovative Concretes for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC // Proceedings of the Workshop on New Technologies and Materials in Civil Engineering. Milan, Italy. 2003. P. 1-8.

89. Okamura, H. Self-Compacting Concrete / H. Okamura, M. Ouchi // J. of Advanced Concrete Technology. 2003. Vol. 1. № 1. P. 5-15.

90. Каприелов, С.С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива / С. С. Каприелов, Батраков В.Г., Шейнфельд А.В. // Бетон и железобетон. 1999. № 6. С. 6-10.

91. Каприелов, С.С. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций / С. С. Каприелов, И.А. Чилин // Вестник НИЦ «Строительство». 2017. № 1(12). С. 14-22.

92. Каприелов, С.С. Новые модифицированные бетоны / С. С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Г.С. Кардумян // М.: ООО «Предприятие Мастер Бетон», 2010. – 258 с.

93. Патент № 2603991 С1 Российская Федерация. Мелкозернистая самоуплотняющаяся бетонная смесь / О. В. Кононова, С. Н. Анисимов, А. Ю. Лешканов, А. О. Смирнов; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. – № 2015117992/03; заявл. 13.05.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34. – С. 5.

94. Рояк, Г.С. Бетон для транспортного строительства / Г.С. Рояк, И.В. Грановская, А.Ю. Тарасова // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2010. № 4-5. С. 46-53.

95. Опыт применения самоуплотняющихся бетонных смесей при сооружении мостов и тоннелей / А. Р. Соловьянчик, В.Н. Коротин, И.С. Пуляев, Н.С. Третьякова // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2012. № 3(25). С. 8-21.

96. Anisimov, S. Self-compacting fine-grained concrete for reinforced concrete frame joints filling / S. Anisimov, O. Kononova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. № 3. P. 032050.

97. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete / URL: [https://www.theconcreteinitiative.eu/images/ECP\\_Documents/EuropeanGuidelinesSelfCompactingConcrete.pdf](https://www.theconcreteinitiative.eu/images/ECP_Documents/EuropeanGuidelinesSelfCompactingConcrete.pdf) (дата обращения 17.12.2023)

98. ГОСТР 59714 – 2021 Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия. М. Российский институт стандартизации 2021. 12 с.

99. ГОСТР 59715- 2022 смеси бетонные самоуплотняющиеся Методы испытаний. М. Российский институт стандартизации 2022. 15 с.

100. СТО СРО-С 60542960 00050-2015 Объекты использования атомной энергии. Основные требования при производстве работ с самоуплотняющимися бетонными смесями (СУБС). М. 2014. 89 с.

101. ОДМ 218.3.070-2016 Методические рекомендации по разработке рецептуры самоуплотняющегося бетона с заданными свойствами по водонепроницаемости для буронабивных свай. Федеральное дорожное агентство (Росавтодор) М. 2016 74 с.

102. Богданов, Р. Р. Самоуплотняющийся бетон для гидроизоляции плоских кровель зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Р. Р. Богданов. – Казань, 2019. – 194 с.

103. Калашников, В. И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов / В. И. Калашников // Строительные материалы. – 2008. – № 10. – С. 4-6.

104. Несветаев, Г. В. О проектировании состава высокопрочного самоуплотняющегося бетона / Г. В. Несветаев, Г. С. Кардунян // Бетон и железобетон. – 2012. – № 6. – С. 8-11.

105. Lin, W. T. Effects of sand/aggregate ratio on strength, durability, and microstructure of self-compacting concrete / W. T. Lin // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 242. – P. 118046.
106. Long, W. J. Sustainable design and ecological evaluation of low binder self-compacting concrete / W. J. Long, Y. Gu, J. Liao [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 167. – P. 317-325.
107. Zuo, W. Optimum design of low-binder Self-Compacting Concrete based on particle packing theories / W. Zuo, J. Liu, Q. Tian [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 163. – P. 938-948.
108. Smirnov, A. Development of high-strength self-compacting concrete with low fineness modulus sand / A. Smirnov, L. Dobshits, S. Anisimov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 869. – № 3. – P. 032-039.
109. Баженов Ю. М. , Воронин В. В., Алимов Л. А. и др. / Высококачественные самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов сжигания угля // *Вестник МГСУ*. – 2017. – Т. 12. – № 12(111). – С. 1385-1391.
110. Кравцов, А. В. Эффективные самоуплотняющиеся бетоны, модифицированные активированным медеплавильным шлаком: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Алексей Владимирович Кравцов. – Кострома, 2019. – 199 с.
111. Оценка влияния карбонатного микронаполнителя на кинетику начального структурообразования и состав гидратных фаз цементных систем / О. В. Тараканов, В. И. Калашников, Е. А. Белякова, К. А. Степкина // *Региональная архитектура и строительство*. – 2014. – № 2. – С. 40-46.
112. Sabet, F. A. Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash / F. A. Sabet, N. A. Libre, M. Shekarchi // *Construction and Building Materials*. – 2013. – Vol. 44. – P. 175-184.
113. Micro and macrolevel properties of fly ash blended self compacting concrete / S. Guru Jawahar, J. C. Sashidhar, I. V. Ramana Reddy et al. // *Materials and Design*. – 2013. – Vol. 46. – P. 696-705.
114. Okamura, H. Mix Design for Self-Compacting Concrete / H. Okamura, K. Ozawa // *Concrete Library of JSCE*. – 1995. – No. 25. – P. 107-120.

115. Ahmed, S. A. R. Review article on Self-Compacting Concrete / S. A. R. Ahmed // Civil Engineering Department, Faculty of Engineering Altahadi University. – 2003. – 52 pp.
116. Properties of self-compacting concrete with slag fine aggregates / M. Shoya, S. Sugita, Y. Tsukinaga, et al. // Proceedings of the Intern. Conf. “Creating with Concrete”. – Dundee, 1999. – P. 121-130.
117. Гусев, Б. В. Свойства бетона с использованием поликарбоксилатных добавок при кавитационной обработке / Б. В. Гусев, Д. И. Оленич, И. Г. Джагарян // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 3. – С. 239-242.
118. Калашников, В.И. Влияние вида супер- и гиперпластификаторов на реотехнологические свойства цементно-минеральных суспензий / В.И. Калашников, Е.В.Гуляева, Д.М.Валиев // Известия высших учебных заведений: Строительство. – 2011. – № 12. – С. 40-45.
119. Chemical admixtures - Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability / J. Plank, E. Sakai, C. W. Miao et al. // Elsevier Ltd. – 2015. – Vol. 78, Part A. – Pp. 81-99.
120. Крамар, Л. Я. Модификаторы цементных бетонов и растворов / Л. Я. Крамар, Б. Я. Трофимов, Е. А. Гамалий. – Челябинск: ООО «Искра-Профи», 2012. – 202 с.
121. Рояк, Г. С. Применение поликарбоксилатов в бетоне - современный путь повышения качества бетонных смесей и бетона / Г. С. Рояк, И. В. Грановская, В. С. Добкин // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2008. – № 3-4. – С. 114-118.
122. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer / K. Yamada, T. Takahashi, S. Hanehara et al. // Cement and Concrete Research. – 2000. – Vol. 30, № 2. – P. 197-207.
123. Вовк, А. И. Адсорбция суперпластификаторов на продуктах гидратации минералов портландцементного клинкера: закономерности процесса и строение адсорбционных слоев / А.И.Вовк // Коллоидный журнал. – 2000. – Т. 62, № 2. – С. 161-169.

124. Высокодисперсные наполнители для порошково-активированных бетонов нового поколения / В.И.Калашников, Р.Н.Москвин, Е.А.Белякова и др. // Системы, Методы, Технологии.– 2014.– № 2(22).– С. 113-118.
125. Ушеров-Маршак, А.В Добавки нового поколения / А.В Ушеров-Маршак // Химические и минеральные добавки в бетон.– Харьков: Колорит, 2005.– С. 45-50
126. Фаликман В. Р. Поликарбоксилатные гиперпластификаторы: вчера, сегодня, завтра // Популярное бетоноведение. – 2009. – № 2. – С. 86-90.
127. Kong, F. R. Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste / F. R. Kong, L. S. Pan, C. M. Wang // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 105. – P. 545-553.
128. Смирнов, А. О. Структурообразование бетонов с органоминеральными добавками / А. О. Смирнов, А. Ю. Лешканов, О. В. Кононова // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы XI международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – Т. 4. – С. 209-212.
129. СТО 70386662-306-2013 Добавки на основе эфиров поликарбоксилатов для изготовления вибрационных и самоуплотняющихся бетонов. – М.: ООО «БАСФ Строительные системы», 2013. – 73 с.
130. Felekoglu, B. Effect of chemical structure of polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of self-compacting concrete / B. Felekoglu, H. Sarikahya // Construction and Building Materials. – 2008. – Vol. 22, № 9. – P. 1972-1980.
131. Haehnel, C. Interaction Between Cements and Superplasticizers / C. Haehnel, H. Lombois-Burger // Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement. – 2007. – P. 111-125.
132. Koizumi, K. Effects of Chemical Admixtures on the Silicate Structure of Hydrated Portland Cement / K. Koizumi, Y. Umemura // Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement. – 2007. – P. 64-71.
133. Lothenbach, B. The influence of superplasticizers on the hydration of Portland cement / B. Lothenbach, F. Wirmefeld // Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement. – 2007. – P. 211-233.

134. Influences of superplasticizer modification and mixture composition on the performance of self-compacting concrete at varied ambient temperatures / W. Schmidt, H. J. H. Brouwers, H. C. Kühne, B. Meng // *Cement and Concrete Composites*. – 2014. – Vol. 49. – Pp. 111-126.
135. Изотов, В. С. Исследование продуктов гидратации портландцемента, модифицированного комплексной добавкой / В. С. Изотов, Р. А. Ибрагимов // *Неорганические материалы*. – 2015. – Т. 51. – № 2. – С. 228-232.
136. Тараканов, О. В. Влияние компонентов комплексных добавок на фазовый состав и микроструктуру цементного камня / О. В. Тараканов, Е. А. Белякова, Е. С. Утюгова // *Региональная архитектура и строительство*. – 2019. – № 4(41). – С. 68-73.
137. Li, P. P. Effect of PCE-type superplasticizer on early-age behaviour of ultra-high performance concrete (UHPC) / P. P. Li, Q. L. Yu, H. J. H. Brouwers // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 153, № 10. – Pp. 740-750.
138. Plank, J. Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption / J. Plank, C. Hirsch // *Cement and Concrete Research*. – 2007. – Vol. 37, № 4. – Pp. 537-542.
139. Han, S. Mechanistic study on the effect of sulfate ions on polycarboxylate superplasticisers in cement / S. Han, J. Plank // *Advances in Cement Research*. – 2013. – Vol. 25, № 4. – Pp. 200-207.
140. Тараканов, О. В. Перспективы применения комплексных добавок в бетонах нового поколения / О. В. Тараканов, В. И. Калашников // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2017. – № 1 (39). – С. 223-229.
141. Lesti, M. Ca<sup>2+</sup>-mediated interaction between microsilica and polycarboxylate comb polymers in a model cement pore solution / M. Lesti, S. Ng, J. Plank // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2010. – Vol. 93, № 10. – Pp. 3493-3498.
142. Plank, J. Effectiveness of polycarboxylate superplasticizers in ultra-high strength concrete: The importance of PCE compatibility with silica fume / J. Plank, C. Schroefl, M. Gruber [et al.] // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2009. – Vol. 7, № 1. – Pp. 5-12.

143. Schröfl, C. Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC) / C. Schröfl, M. Gruber, J. Plank // *Cement and Concrete Research*. – 2012. – Vol. 42, № 11. – Pp. 1401-1408.

144. Егорова, Е. В. Самоуплотняющиеся бетоны с полифункциональным модификатором на основе отходов промышленности: дис... канд. техн. наук: 05.23.05 / Егорова Елена Владимировна. – Макеевка, 2016. – 161 с.

145. Калашников, В. И. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения / В. И. Калашников, В. Т. Ерофеев, О. В. Тараканов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2016. – № 4 (688). – С. 30-37.

146. Соломатов, В. И. Особенности формирования свойств цементных композиций при различной дисперсности цементов и наполнителей / В. И. Соломатов, О. В. Кононова // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 1991. – № 5. – С. 42-45.

147. Тараканов, О. В. Эффективность применения комплексных органоминеральных добавок для бетонов / О. В. Тараканов, Т. К. Акчурин, Е. С. Утюгова // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. – 2020. – № 1(78). – С. 174-181.

148. Влияние кварцевого порошка и минеральных добавок на свойства высокопрочных бетонов / О. В. Александрова, Д. В. Нгуен, Б. И. Булгаков, В. Б. Петропавловская // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы, Конструкции, Технологии»*. – 2020. – № 3. – С. 7-15.

149. Гусев, Б. В. Бетоны с наполнителями различной дисперсности и их наномодификация / Б. В. Гусев // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. – 2019. – Т. 11. – № 4. – С. 384-393.

150. Ерофеев, В. Т. Свойства модифицированных порошково-активированных бетонов / В. Т. Ерофеев, О. В. Тараканов, А. И. Родин // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2021. – № 7. – С. 27-49.

151. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами / В. И. Калашников, М. Н. Мороз, О. В. Тараканов и др. // Строительные материалы. – 2014. – № 9. – С. 70-75.

152. Иващенко, Ю. Г. Структурообразующая роль органоминеральных добавок при твердении цементных композиций / Ю. Г. Иващенко, С. М. Зинченко, Н. А. Козлов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 3. – № 1. – С. 168-171.

153. Иващенко, Ю. Г. Оценка роли активных минеральных наполнителей в формировании структуры композиционных строительных материалов / Ю.Г Иващенко, Р.Т Мамешов, М.П Кочергина // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. – 2020. – № 1. – С. 39-43.

154. Тараканов, О. В. Влияние комплексных минеральных добавок на прочность и состав гидратации цементных материалов / О.В Тараканов, Е.А Белякова // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 4(45). – С. 46-52.

155. Баженов, Ю. М. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы / Ю. М. Баженов, Е. М. Чернышов, Д. Н. Коротких // Строительные материалы. – 2014. – Т. 3(711). – С. 6-14.

156. Баженов, Ю. М. Современная технология бетона / Ю. М. Баженов // Технологии бетонов. – 2005. – № 6. – С. 6-8. ГОСТ Р 56592-2015 Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. М. Стандартинформ. 2015. 11 с.

157. ГОСТ Р 56592-2015 Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. М. Стандартинформ. 2015. 11 с.

158. ГОСТ Р 56593-2015 Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Методы испытаний. М. Стандартинформ. 2016. 8 с.

159. Ольгинский, А. Г. Процессы гидратации портландцемента с минеральной пылью различного состава / А. Г. Ольгинский // Известия высших учебных заведений "Строительство". – 1991. – № 12. – С. 50-53.

160. Каприелов, С. С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов / С. С. Каприелов // Бетон и железобетон. – 1995. – № 4. – С. 16-20.

161. Минаков, С. В. Влияние электроповерхностных свойств минеральных добавок на эффективность разжижителей цементных систем: дисс... канд. техн. наук: 05.23.05 / С. В. Минаков. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2011. – 131 с.

162. Ольгинский, А. Г. Процессы гидратации портландцемента с минеральной пылью различного состава / А. Г. Ольгинский // Известия высших учебных заведений "Строительство". – 1991. – № 12. – С. 50-53.

163. Комохов, П.Г. Научно-техническая технология конструкционного бетона как композиционного материала (Часть 1) // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2002. №4.- С.36-37.

164. Комохов, П.Г. Научно-техническая технология конструкционного бетона как композиционного материала (Часть 2) / П.Г. Комохов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2002. – № 5. – С. 26-27.

165. Шейнфельд, А. В. Особенности формирования иерархической микро- и наноструктуры цементных систем с комплексными органо-минеральными модификаторами / А. В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. – 2016. – № 2. – С. 16-21.

166. Mehmet, G. Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume / G. Mehmet, E. Erhan, O. Erdogan // Construction and Building Materials. – 2009. – Vol. 23. – P. 1847-1854.

167. Zaichenko, H. M. High-strength fine-grained concretes with modified mineral admixtures of fly ash and milled slag of power station / Zaichenko N.M., Khalyushev A.K., Sakhoshko E.V. // Alkali Activated Materials – Research, Production, Utilization: International Conf., June 2007: Proc. – Prague (Czech R.), 2007. – P. 745-756.

168. Оценка эффективности комбинирования минеральных добавок в мелкозернистом бетоне / А. К. Халюшев, В. В. Прудников, С. А. Стельмах и др. //

Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2017. – Т. 9, № 5. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/25TVN517.pdf> (дата обращения: 17.12.2023).

169. Ермилова, Е. Ю. Исследование влияния композиционных цементов с комплексной минеральной добавкой на физико-механические и другие эксплуатационные свойства строительных растворов / Е. Ю. Ермилова, З. А. Камалова, Р. З. Рахимов // Известия КГАСУ: Строительные материалы и изделия. – 2016. – № 1 (35). – С. 165–171.

170. Оптимизация состава бетона с дисперсными минеральными добавками / С. А. Высоцкий, М. И. Бруссер, В. П. Смиронов, А. М. Царик // Бетон и железобетон. – 1990. – № 2. – С. 7–9.

171. Естемесов, З. А. Свойства бетонов на основе тонкомолотых многокомпонентных вяжущих / З. А. Естемесов, Ж. С. Урлибаев, М. У. Уралиева // Бетон и железобетон. – 1993. – № 1. – С. 9–10.

172. Калашников, В. И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего / В. И. Калашников // Строительные материалы. – 2016. – № 1/2. – С. 96–103.

173. Белов, В. В., Куляев, П. В. Теоретическое обоснование оптимальных зерновых составов композиционных материалов с минеральными наполнителями / В. В. Белов, П. В. Куляев // Строительство и реконструкция. – 2017. – № 5 (73). – С. 94–101.

174. Применение комплексного подхода к оптимизации производственных составов на примере товарного бетона / Резаев, Р. О., Дмитриев, А. А., Бородуля, Н. А., Чернявский, Д. В. // ALITinform: Цемент, Бетон, Сухие Смеси. – 2021. – № 2 (63). – С. 42–55.

175. Низина, Т. А. Построение экспериментально-статистических моделей «состав – свойство» физико-механических характеристик модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов / Т. А. Низина, А. С. Балыков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета: Серия: Строительство и архитектура. – 2016. – С. 54–66.

176. Низина, Т. А. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов / Т. А.

Низина, А. С. Балыков // Инженерно-строительный журнал. – 2016. – № 2. – С. 13–24.

177. Низина, Т. А. Применение моделей «состав – свойство» для исследования свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов / Т. А. Низина, А. С. Балыков, Л. В. Макарова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 12. – С. 15–21.

178. Дворкин, Л. И. Оптимальное проектирование составов бетона / Л. И. Дворкин. – Львов: Вища школа, 1981. – 159 с.

179. Вознесенский, В. А. Статистические решения в задачах анализа и оптимизации качества строительных материалов (методология и опыт применения): Автореферат диссертации д-ра техн. наук: 05.23.05 / Московский инженерно-строительный институт; В.А Вознесенский – М., 1970. – 44 с.

180. Вознесенский, В.А. Компромиссная многофакторная оптимизация гарантированного качества шлакощелочных вяжущих / В.А Вознесенский, Т.В Ляшенко, А.Д Довгань // Современное промышленное и гражданское строительство.– 2007.– Т. 3, № 1.– С. 5–15.

181. Комохов, П. Г. Структура и свойства цементного камня с позиции компьютерного материаловедения / П. Г. Комохов, А. М. Харитонов // Academia. Архитектура и строительство. – 2007. – № 4. – С. 63–66.

182. Комохов, П. Г. Имитационно-численная модель структуры и свойств цементного камня / П. Г. Комохов, А. М. Харитонов // Известия вузов. Строительство. – 2008. – № 4 (592). – С. 10–16.

183. О возможности повышения статистической значимости регрессионных зависимостей в задачах обработки экспериментальных выборок малого объема / Грачев В. В., Шварц М. А., Грищенко А. В., Шварц Ф. М. // Автоматика на транспорте. – 2024. - №. 4. - С. 382-394.

184. Невилл А. М. Свойства бетона. //Сокращенный перевод с английского канд. техн. наук В. Д. Парфенова и Т. Ю. Якуб, М.: Стройиздат, - 1972. - 345с.

Таблица А.1 - Пример генерации данных для кластера № 13

номер строки	Значения векторов входных и выходных параметров							
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$
1	0,590496	0,197193	0,572864	0,682957	637,34032	12,6165479	68,8932782	8,4363448
2	0,575094	0,157871	0,52434	0,644516	638,31566	11,1874253	69,2849052	8,43966937
3	0,60904	0,171478	0,58736	0,690055	637,39693	10,669782	68,8734138	8,43954879
4	0,558446	0,17086	0,571122	0,712603	638,26805	10,8809248	69,1601777	8,45168281
5	0,631025	0,184428	0,570499	0,691751	637,25315	11,629425	68,8853049	8,42104986
6	0,618275	0,173902	0,613106	0,704819	637,24274	11,7389254	68,9860332	8,4469057
7	0,605377	0,168161	0,480704	0,611059	637,8302	10,9992579	69,326086	8,43388659
8	0,600264	0,204827	0,660803	0,718017	638,2856	11,2322956	69,263351	8,44766617
9	0,608121	0,21381	0,598041	0,736211	633,95607	11,1159377	68,7242532	8,41722524
10	0,594304	0,185993	0,560166	0,673318	637,16957	12,2417279	68,9946866	8,43615583
11	0,584713	0,206135	0,595713	0,655713	637,90985	11,6035059	68,9491999	8,42984462
12	0,606472	0,187167	0,531502	0,625953	637,85828	11,3677375	69,054063	8,43182862
13	0,59711	0,182796	0,592499	0,6965	637,37385	11,1096546	68,765772	8,44056764
14	0,580705	0,193352	0,595246	0,735205	638,30475	10,8341917	68,9974445	8,44267476
15	0,605731	0,184881	0,608023	0,678969	637,11777	11,4905976	68,9281589	8,43444896
16	0,596841	0,21196	0,657834	0,727852	638,63052	11,4906117	69,2189074	8,44866425
17	0,610934	0,152285	0,561577	0,746751	637,02309	10,7773893	68,8957733	8,40778351
18	0,614717	0,217642	0,605593	0,673322	636,81534	11,3453731	69,0060729	8,43623385
19	0,608773	0,210742	0,578322	0,644984	637,96356	12,1673256	69,2237598	8,42275774
20	0,59929	0,196951	0,527916	0,646612	637,90272	12,3023443	68,8532323	8,44300002
21	0,603552	0,211177	0,626265	0,716167	638,71471	11,3574974	69,2876756	8,46679282
22	0,572384	0,215028	0,591245	0,659735	638,27385	11,0326976	68,9638531	8,43655759
23	0,621445	0,186175	0,578587	0,674246	636,29128	11,0333249	68,7936264	8,42005938
24	0,581661	0,176196	0,574836	0,699374	637,43938	12,0510243	69,0157485	8,43720964
25	0,575044	0,197334	0,593737	0,703921	638,48717	11,3437504	69,2441165	8,45348543
26	0,606432	0,192045	0,578626	0,686649	637,69985	11,2155773	68,9853323	8,41778558
27	0,587686	0,181761	0,523685	0,696321	638,39123	11,1292891	69,236064	8,4420597
28	0,57412	0,181288	0,589923	0,697787	638,34522	11,3831818	69,1540736	8,45327264
29	0,614067	0,195136	0,59576	0,706844	637,48825	11,7313907	68,8224781	8,43712199
30	0,587417	0,182548	0,526983	0,688998	637,22553	11,2289928	68,8365638	8,43546578
31	0,602531	0,198139	0,567968	0,695097	638,11234	11,5332812	69,1529012	8,44746554
32	0,573053	0,188748	0,632315	0,693341	637,92576	11,4687651	69,1757196	8,43383694
33	0,567342	0,177733	0,56324	0,688963	638,92727	11,7480479	69,3590474	8,44954124
34	0,604887	0,214325	0,660013	0,680534	638,02124	11,258547	69,070915	8,43821025
35	0,601759	0,200316	0,57627	0,732379	638,02673	11,0029519	69,2729974	8,4361538
36	0,589652	0,189241	0,555871	0,708281	634,18816	12,0902754	68,5780799	8,40183657
37	0,572259	0,193078	0,592785	0,721896	637,70237	11,4723846	68,8564825	8,42470983
38	0,617255	0,201949	0,65278	0,735796	637,81563	11,2838164	69,0591949	8,44320115
39	0,555145	0,161134	0,502578	0,724287	637,42954	11,4910647	68,8998538	8,42614159
40	0,594132	0,204499	0,585733	0,721533	638,44933	11,8800655	69,1735625	8,46058547
41	0,616268	0,20163	0,585537	0,632595	634,53568	11,5896493	68,0757236	8,37124366
42	0,612382	0,177342	0,518538	0,708907	637,85587	10,620904	69,1502935	8,44073027
43	0,600047	0,201498	0,651321	0,736957	637,73132	11,4154093	68,7659347	8,44790936
44	0,596836	0,178237	0,616484	0,758981	636,31824	11,0247739	68,4447324	8,40624028
45	0,594251	0,171658	0,609245	0,730536	637,57965	12,135376	69,0494025	8,44639146

Продолжение таблицы А.1

номер строки	Значения векторов входных и выходных параметров							
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$
46	0,578715	0,161378	0,488312	0,655631	637,45174	11,7297418	69,0547264	8,43084118
47	0,604352	0,205825	0,614222	0,708733	637,45235	11,5868017	69,1303456	8,4473936
48	0,612507	0,194122	0,615162	0,755904	637,42928	11,0473119	69,3147206	8,4352079
49	0,594252	0,192673	0,610396	0,730187	638,53928	10,9288901	69,1963184	8,4492864
50	0,596043	0,188103	0,618782	0,726923	636,57696	11,7355406	69,0430355	8,43591517
51	0,585776	0,196916	0,593619	0,648187	636,86081	12,3247623	68,8845372	8,44061679
52	0,595774	0,17869	0,611529	0,695935	636,36642	10,7273459	68,6817789	8,40351456
53	0,626103	0,189103	0,597477	0,688845	634,38583	11,6931975	68,2769299	8,39277685
54	0,612534	0,180674	0,599673	0,68514	638,2106	11,5847006	69,2056644	8,44942319
55	0,594294	0,174402	0,496504	0,693197	637,672	10,7693829	69,1789573	8,41412258
56	0,612832	0,187583	0,623055	0,72287	638,56113	11,2390943	69,2638183	8,44931021
57	0,622694	0,208853	0,577221	0,704603	637,92015	11,0921904	69,0739024	8,44013852
58	0,610591	0,187574	0,551393	0,63391	636,38847	12,0623134	68,696574	8,4223879
59	0,598273	0,168309	0,552097	0,708165	637,91481	11,2102866	68,9809597	8,43200848
60	0,565285	0,180127	0,540119	0,748623	637,77855	11,127983	69,2315578	8,43123078
61	0,597617	0,190854	0,593591	0,755116	637,84348	11,6309717	68,9683217	8,43780291
62	0,591304	0,203854	0,571131	0,668388	633,74336	11,2274662	68,2528305	8,33860847
63	0,58661	0,171142	0,521857	0,664295	638,6496	11,574965	69,238705	8,44859332
64	0,571302	0,177903	0,557551	0,676323	637,90298	11,892274	69,0028977	8,43511975
65	0,608284	0,167978	0,568512	0,682324	637,43401	10,8425334	69,0305853	8,44298837
66	0,586738	0,170399	0,537939	0,559694	636,82877	11,5145519	68,4027797	8,39801955
67	0,606158	0,215072	0,555288	0,692484	638,44643	11,6441533	69,1812271	8,41876644
68	0,564038	0,159186	0,623292	0,737543	636,52908	10,7720479	68,66539	8,39814165
69	0,612923	0,193768	0,61013	0,695825	636,97727	12,1409647	68,8935119	8,42838043
70	0,57375	0,188694	0,606971	0,709243	638,52791	11,1921571	69,1925716	8,45677251
71	0,591239	0,168759	0,601354	0,752661	638,78189	11,2367228	69,3051159	8,45760947
72	0,598627	0,167536	0,543764	0,696568	635,84808	11,4967473	68,5329521	8,41664463
73	0,606339	0,191159	0,552819	0,681661	638,36536	11,3857605	69,1074729	8,44680032
74	0,58795	0,19311	0,559835	0,721045	637,41016	11,8783012	68,8138664	8,45227
75	0,592196	0,206122	0,581581	0,705327	637,38976	11,6255291	68,723619	8,43317324
76	0,545993	0,149521	0,573411	0,624474	637,88097	11,320506	68,5543644	8,3840971
77	0,552188	0,1771	0,550606	0,703735	638,08098	11,8238047	69,0680444	8,46111745
78	0,624493	0,171026	0,554638	0,615197	637,75543	10,736227	68,8692915	8,43371636
79	0,594189	0,206821	0,512665	0,695603	636,72501	11,4002675	68,7440634	8,42080617
80	0,574429	0,19373	0,622945	0,719878	638,0526	11,5394227	69,3190265	8,44036245
81	0,584093	0,189035	0,602309	0,726517	637,02644	10,8984135	69,0432525	8,43417132
82	0,61415	0,210521	0,596195	0,675636	637,72552	11,2104669	68,9573777	8,42390782
83	0,611256	0,190685	0,606571	0,702071	638,19569	10,9627359	69,2373991	8,4440214
84	0,579661	0,195832	0,649052	0,738381	638,03875	10,9102301	69,3286479	8,43851069
85	0,597551	0,162105	0,542589	0,724159	638,07037	11,5230143	69,1821659	8,43333131
86	0,594082	0,208875	0,588655	0,689684	638,00735	11,6209701	68,6766469	8,43814236
87	0,574522	0,175939	0,569313	0,678709	637,46071	11,4521459	69,0528738	8,42794725
88	0,631965	0,201629	0,580057	0,675541	637,724	10,98563	69,0273809	8,4420222
89	0,580626	0,203329	0,598637	0,716969	637,19788	11,6652653	69,0886766	8,4231894
90	0,606609	0,151562	0,593843	0,69403	635,58109	11,9734831	68,7860203	8,39652649
91	0,577824	0,161192	0,517969	0,597898	636,85112	12,5466943	68,8532531	8,43303594

Продолжение таблицы А.1

номер строки	Значения векторов входных и выходных параметров							
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$
92	0,628418	0,188711	0,593106	0,708714	635,52994	12,4600038	68,4689987	8,42652056
93	0,598783	0,204431	0,545028	0,632104	635,76206	12,0360702	68,4877074	8,42533907
94	0,57963	0,202072	0,599141	0,695754	638,76602	11,8520401	69,2470956	8,46071365
95	0,615126	0,207358	0,564462	0,756386	637,81063	11,5126327	69,0123731	8,44166097
96	0,595831	0,207825	0,5988	0,643876	637,75581	11,0436469	68,8056135	8,41372234
97	0,620416	0,238913	0,646543	0,706862	637,40898	11,6881862	69,1531682	8,43718025
98	0,579931	0,201613	0,570589	0,733784	636,87752	11,2880424	68,9760113	8,42280436
99	0,596724	0,197773	0,604768	0,720521	638,37364	11,0568225	69,1223431	8,44356239
100	0,61147	0,15297	0,607013	0,756933	637,23785	11,4276946	68,9511609	8,3943454
101	0,577775	0,167907	0,572451	0,709267	638,26469	11,5418397	68,8384998	8,42999509
102	0,617603	0,18795	0,63172	0,728859	637,87872	11,2090014	68,9759862	8,39967728
103	0,597512	0,175709	0,606139	0,72886	638,09364	12,4140173	68,9635944	8,43586653
104	0,622293	0,189347	0,616575	0,706863	637,80693	10,7810348	68,8087595	8,44166958
105	0,630287	0,215032	0,688548	0,757396	634,20128	10,9907076	68,4241295	8,4114607
106	0,600935	0,19855	0,584398	0,753692	637,19299	11,1562349	69,0087682	8,44205615
107	0,584401	0,177151	0,630172	0,704108	638,10921	12,3806685	69,2397147	8,45417446
108	0,557507	0,190175	0,563466	0,747363	636,86516	11,1878917	69,1489083	8,43873513
109	0,594293	0,189173	0,579599	0,687259	635,30472	11,495804	68,2350981	8,38549542
110	0,57155	0,189287	0,549911	0,65308	637,81509	11,3445476	68,7502551	8,43350053
111	0,625291	0,128294	0,573217	0,666604	631,96598	11,0029079	68,4957683	8,34981889
112	0,574617	0,16681	0,539333	0,71856	638,47618	10,12941	69,2613316	8,42212597
113	0,590948	0,172713	0,642135	0,695572	637,81357	11,1312836	69,2208266	8,44727808
114	0,57841	0,19617	0,548791	0,731348	637,48447	11,24686	68,7546611	8,4355053
115	0,593474	0,16294	0,562976	0,694353	638,10524	10,7443601	68,9671451	8,43760279
116	0,56799	0,18062	0,566913	0,729258	637,70092	11,59238	68,7333697	8,43425137
117	0,614909	0,210023	0,58408	0,706754	638,66791	11,8953481	69,2065614	8,45528096
118	0,577623	0,180854	0,563671	0,726252	638,17055	11,6269477	69,1271579	8,46169603
119	0,588959	0,163293	0,549392	0,690311	637,8476	11,1179434	69,1460001	8,43235806
120	0,603603	0,22036	0,621074	0,711237	637,62486	11,2669244	69,2343742	8,45189965
121	0,611467	0,194129	0,647303	0,756079	636,90998	12,0683365	68,3769488	8,38245153
122	0,589784	0,189191	0,594475	0,714528	638,41934	11,27	69,2517227	8,45567867
123	0,597428	0,214684	0,582566	0,69454	638,3168	11,3942452	69,0867698	8,44586152
124	0,605189	0,221626	0,591122	0,727006	637,43797	10,6895447	69,1753608	8,42229417
125	0,615055	0,218071	0,618571	0,753917	634,49738	10,7815467	68,4793127	8,39619666
126	0,602989	0,195521	0,573113	0,737622	638,35564	11,2600997	68,9987838	8,44733787
127	0,595628	0,229686	0,564516	0,691039	636,47064	11,1027665	68,3989412	8,34602416
128	0,581047	0,190511	0,56332	0,708345	637,38789	11,4397839	68,7608361	8,40696478
129	0,597212	0,174854	0,597611	0,73421	637,24892	12,2769028	68,8918889	8,42150128
130	0,576094	0,174075	0,597798	0,70625	638,30391	11,6107792	69,3134105	8,45393735
131	0,573857	0,19972	0,52092	0,641115	637,36435	11,9420074	68,8055301	8,41145918
132	0,602482	0,204314	0,602237	0,696375	638,19466	12,0075725	69,1178119	8,445517
133	0,59747	0,196234	0,568628	0,673728	638,09998	11,6116449	69,1447568	8,41300797
134	0,590857	0,180577	0,52393	0,682435	637,90993	11,9005278	69,113456	8,44453919
135	0,613743	0,192496	0,621065	0,69194	638,27091	12,2114614	69,0011662	8,44248274
136	0,589442	0,194907	0,53313	0,694355	638,51437	11,4977255	69,1752565	8,46092796
137	0,622736	0,188038	0,634275	0,662434	637,61497	11,6165116	68,9162886	8,43691072
138	0,598257	0,198465	0,589503	0,730941	637,81403	11,0864341	69,0727842	8,43119127

Продолжение таблицы А.1

номер строки	Значения векторов входных и выходных параметров							
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$
139	0,577224	0,180435	0,532942	0,69597	638,36777	12,0742723	69,3287396	8,45598975
140	0,598029	0,190684	0,579653	0,699698	637,31537	11,8950412	68,8609302	8,43648463
141	0,597077	0,195294	0,604062	0,669741	637,48058	10,8537287	68,8855469	8,41990942
142	0,596984	0,222245	0,613911	0,721553	638,47511	11,7782518	69,3273085	8,4587484
143	0,570846	0,162607	0,585509	0,616568	637,59972	11,8570521	69,0533954	8,42349237
144	0,615479	0,170322	0,569005	0,748691	638,51547	11,2763733	69,1770923	8,43992218
145	0,57888	0,167985	0,546514	0,716466	638,41846	11,4374183	69,3101102	8,4658829
146	0,579143	0,184748	0,611871	0,756618	635,63484	11,09896	68,8757336	8,38864064
147	0,612032	0,208637	0,58865	0,708519	637,82997	12,168023	69,0197331	8,44700602
148	0,58267	0,16986	0,570996	0,761001	638,10028	11,3506623	69,1454995	8,43872297
149	0,597984	0,204576	0,615841	0,710847	638,37212	11,5776464	69,2574596	8,45999119
150	0,606354	0,160019	0,592949	0,751056	637,02232	11,1989349	69,1333246	8,4072946
151	0,576823	0,184814	0,528638	0,684473	638,79166	11,8868873	69,3447614	8,46160027
152	0,618533	0,197586	0,666815	0,771314	638,39504	10,9088413	69,4027692	8,45118934
153	0,600702	0,197419	0,566269	0,642696	638,06297	11,1368649	68,8456511	8,43584982
154	0,623267	0,176237	0,532269	0,681777	637,86144	11,600329	69,2072666	8,435444
155	0,596501	0,1986	0,665057	0,7445	637,94563	11,3759644	69,2448217	8,44225222
156	0,609298	0,20744	0,601974	0,693902	637,43469	10,8566836	69,0162241	8,41641107
157	0,601544	0,197703	0,610295	0,70371	638,09601	11,4894517	69,0855265	8,44247818
158	0,571509	0,161458	0,539833	0,661606	637,38853	12,4151073	68,8467777	8,40410024
159	0,588592	0,178414	0,568704	0,721535	638,09879	11,1575983	69,1284347	8,44455844
160	0,581235	0,170468	0,631063	0,675596	637,24113	11,5445741	69,0574467	8,42619377
161	0,589492	0,194041	0,636279	0,728871	638,31932	11,7865309	69,2311072	8,45158908
162	0,582372	0,185445	0,633009	0,715531	638,15788	10,8404428	69,3180501	8,44787794
163	0,575483	0,202913	0,605055	0,73339	636,40976	11,2551674	68,5625756	8,40621799
164	0,592494	0,240541	0,62917	0,7533	638,03356	10,4514137	69,2718959	8,43631846
165	0,568051	0,158721	0,472953	0,649977	637,93945	11,7759958	69,0170419	8,44209161
166	0,586006	0,180357	0,590708	0,738502	635,14442	11,677213	68,6412323	8,39134508
167	0,592245	0,190502	0,558713	0,651177	638,36338	11,6471022	69,2788804	8,45366073
168	0,594928	0,210451	0,638181	0,717355	638,25485	11,3263562	69,330442	8,45151359
169	0,613213	0,172841	0,531757	0,709195	637,48867	11,6228662	68,7331986	8,42674702
170	0,642191	0,198359	0,583339	0,668634	637,40364	11,6486087	68,4992981	8,41361746
171	0,623291	0,216957	0,640777	0,741301	637,86221	11,4989236	69,0621364	8,43667614
172	0,590277	0,192946	0,595261	0,74496	638,09258	11,09327	69,0873039	8,44944954
173	0,587421	0,171549	0,52313	0,735472	637,3505	11,8384026	69,0322793	8,41935617
174	0,616747	0,195499	0,604536	0,723948	638,25462	11,3461718	69,2113137	8,45235157
175	0,58799	0,203486	0,629234	0,742853	637,40532	10,7585892	68,810879	8,44605505
176	0,591281	0,176469	0,612027	0,734825	636,53217	11,441271	68,6814117	8,41057763
177	0,574095	0,145636	0,539555	0,636809	636,58096	11,6721414	68,6726415	8,39381799
178	0,62515	0,198921	0,555182	0,69133	637,89513	12,4012642	68,9279461	8,4356274
179	0,60423	0,217817	0,642728	0,729702	637,07611	10,9110981	69,1273832	8,4171229
180	0,587244	0,193984	0,59567	0,683343	635,13374	11,0602416	68,8540709	8,38344151
181	0,61239	0,187805	0,616232	0,687731	637,04468	11,9377196	68,9152122	8,41620386
182	0,593382	0,180595	0,562212	0,710485	638,70926	11,4943072	69,3280429	8,46002817
183	0,582919	0,193871	0,632358	0,699866	638,29586	12,0437093	69,262141	8,45129725
184	0,62521	0,20211	0,587883	0,708271	638,54179	11,2924166	69,0632045	8,45549121

Продолжение таблицы А.1

номер строки	Значения векторов входных и выходных параметров							
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$
185	0,590406	0,200048	0,583326	0,675874	638,74451	11,2273157	69,326545	8,46154606
186	0,62413	0,202896	0,630352	0,667382	637,88044	11,9525798	68,9444435	8,43696392
187	0,589383	0,200617	0,53438	0,69016	638,19153	11,6531268	69,3168986	8,457268
188	0,599444	0,187339	0,667395	0,718101	636,7794	11,0435396	69,0672433	8,41782257
189	0,600602	0,20136	0,586339	0,747021	638,0563	10,6836841	69,249599	8,43194515
190	0,580346	0,184621	0,572301	0,65575	638,65494	11,4436731	69,1901559	8,4474321
191	0,605976	0,202954	0,547294	0,654207	635,13054	11,2054512	68,4843528	8,41016015
192	0,591854	0,222432	0,545635	0,676374	637,60437	12,1342637	68,7057865	8,4107286
193	0,614432	0,182034	0,617356	0,74666	638,29941	11,3521516	68,9722979	8,43600637
194	0,557848	0,153904	0,547701	0,729465	634,19151	11,1046731	68,8073242	8,37256801
195	0,561958	0,182394	0,590023	0,701096	638,11432	11,21886	68,9875352	8,45003217
196	0,576596	0,188783	0,573958	0,726065	638,95134	11,7537916	69,3195689	8,46751326
197	0,598554	0,215276	0,631122	0,72377	638,04428	10,8457237	69,1865468	8,43811652
198	0,579674	0,164478	0,588014	0,683862	638,17337	11,4857517	69,1240036	8,43364644
199	0,588191	0,183634	0,619199	0,697288	638,38753	11,5482196	69,1215837	8,44844234
200	0,554161	0,227712	0,639275	0,794239	635,56068	11,4882663	68,6599243	8,4115985

## Акт опытно-промышленных испытаний

ООО «НПО «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

---

«19» апреля 2024 г.

УТВЕРЖДАЮ  
Технический директор  
ООО «НПО «Новые технологии»  
«НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» Коньков С.А.



## АКТ

*о проведении опытно-промышленных испытаний бетона, модифицированного комплексной химической добавкой.*

Мы, нижеподписавшиеся, от ФГБОУ ВО ПГУПС Императора Александра I:

- д.т.н., профессор Соловьёва Валентина Яковлевна,
- аспирант Шварц Филипп Михайлович,

от ООО «НПО «Новые технологии»:

- технический директор Коньков Сергей Александрович,
- главный инженер Степанова Ирина Витальевна

составили настоящий акт о нижеследующем:

По согласованию сторон, на основании результатов научных исследований, проведённых в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I, по созданию самоуплотняющейся бетонной смеси, модифицированной разработанной комплексной химической добавкой в сочетании с тонкодисперсными наполнителями различного происхождения, проведены опытно-промышленные испытания бетонной смеси контрольного состава бетона В35 П5 и бетонной смеси модифицированной разработанной комплексной химической добавкой в сочетании с тонкодисперсными наполнителями различного происхождения, а также изготовлены и испытаны образцы бетона на основе смеси контрольного и модифицированных составов.

На первом этапе опытно-промышленной апробации произведен выпуск опытно-промышленной партии массой 15 кг разработанной комплексной химической добавки следующего состава:

- |  |     |
|--|-----|
| 1. Водный раствор поликарбонатного полимера этилового эфира метакриловой кислоты с $\rho = 1,027 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 6,0 - 6,5$ | 32% |
| 2. Водный раствор поликарбонатного полимера ангидрида малеиновой кислоты с $\rho = 1,029 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 6,0 - 6,5$         | 10% |
| 3. Водный раствор кремниевой кислоты с $\rho = 1,023 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 3,5 - 4,0$   | 32% |
| 4. Диамин полипропилен с $\rho = 1,005 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 9,0 \pm 0,5$   | 26% |

Параметры комплексной химической добавки опытно-промышленного изготовления:  $\rho = 1,020 \text{ г/см}^3 \pm 0,002$  и  $\text{pH} = 6,5 \pm 0,5$ .

Для создания самоуплотняющейся бетонной смеси (СУБС) использовали следующие материалы:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, нормально твердеющий;
- песок для строительных работ по ГОСТ 8736-2014, с модулем крупности  $M_k=1,8$ ;
- щебень гранитный, фракция 5-10 мм ГОСТ 8267-93
- тонкодисперсный наполнитель в количестве 10% от массы цемента, представленный известняком с удельной поверхностью  $320 \text{ м}^2/\text{кг}$ ;
- тонкодисперсный наполнитель в количестве 10% от массы цемента, представленный тонкомолотым гранулированным доменным шлаком с величиной удельной поверхности  $320 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Результаты опытно-промышленного испытания самоуплотняющейся бетонной смеси представлены в таблице 1, испытания проводились по ГОСТ Р 59714. Сравнительные характеристики бетона контрольного состава и бетона на основе бетонной смеси, модифицированной комплексной химической добавкой, а также в присутствии тонкодисперсных наполнителей представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Сравнительные реологические характеристики самоуплотняющейся бетонной смеси, модифицированной комплексной химической добавкой

Расход цемента на 1 $\text{м}^3$ бетонной смеси, кг	Кол-во разрабатанной добавки, % от массы цемента, (кг)	Тонкодисперсный наполнитель, масс. % от массы цемента (кг)		В/Ц	Расплав конуса, мм	Средняя плотность, $\text{кг/м}^3$	Вязкость $t_{500}$ , с	Раствороотделение, %	Текущесть по методу блокирующего кольца, мм,
		Известняк	Доменный шлак						
460	-	-	-	0,58	360	2279	-	18,0	-
460	1,0 (4,6)	-	-	0,39	660	2210	4,0	11,5	5,5
460	1,0 (4,6)	10,0 (46,0)	-	0,39	680	2230	6,0	7,7,0	5,0
460	1,0 (4,6)	-	10,0 (46,0)	0,39	700	2225	5,5	7,5,0	4,0

Таблица 2 – Характеристики бетона на основе бетонной смеси, модифицированной комплексной химической добавкой

Расход цемента на 1 м <sup>3</sup> , кг	Кол-во добавки % от массы цемента	Кол-во тонкодисперсн. наполнит., % от массы цемента, (кг)		Предел прочности в возрасте 28 суток, МПа					R <sub>тб</sub> /R	Усадка, мм/м	Водонепроницаемость, W	Морозостойкость F <sub>2</sub>
		Известняк	Доменный шлак	на сжатие	Класс бетона В	на растяжение при сжатии	Класс бетона В <sub>тб</sub>	призмная, (% от кубиковой)				
460	-	-	-	44	В 35	5,2	В <sub>тб</sub> 4,0	31,0 (70,4)	0,116	1,3	8	200
460	1,0	-	-	72	В 55	8,9	В <sub>тб</sub> 7,2	59,0 (81,9)	0,129	0,4	12	400
460	1,0	10 (46)	-	76,6	В 60	9,6	В <sub>тб</sub> 8,0	63,5 (82,9)	0,133	0,3	14	400
460	1,0	-	10 (46)	75,6	В 60	9,7	В <sub>тб</sub> 8,0	62,7 (83,0)	0,134	0,3	14	400

По результатам опытно-промышленных испытаний самоуплотняющейся бетонной смеси, модифицированной разработанной комплексной химической добавкой опытно-промышленного изготовления и бетона на основе СУБС, установлено, что разработанные составы бетонной смеси рекомендуется использовать для изготовления густоармированных железобетонных конструкций без применения операции вибрирования, обеспечивающий получение бетона повышенной прочности, а также на разработанную комплексную химическую добавку целесообразно разработать нормативную документацию.

Технический директор ООО «НПО «Новые технологии»

Коньков С. А. 

Главный инженер ООО «НПО «Новые технологии»

Степанова И.В. 

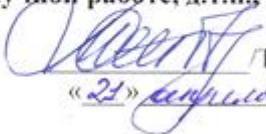
д.т.н., профессор

Соловьёва В. Я. 

Аспирант

Шварц Ф. М. 

## Стандарт организации на комплексную химическую добавку

Подпись и дата	<p>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)</p> <p>ОКП 20.59.59</p> <p>ОКС 01.100.10</p> <p>Группа Ж13</p> <p><b>УТВЕРЖДАЮ</b> Первый проректор – проректор по научной работе, д.т.н., профессор  Т.С. Титова «21» апреля 2023 г.</p> <p><b>КОМПЛЕКСНАЯ ХИМИЧЕСКАЯ ДОБАВКА ДЛЯ БЕТОНОВ И СТРОИТЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СТО 20.59.59-007-985 93931-2023</b></p> <p>Введены впервые</p>
Ивл. № дубл.	<p>Дата введения</p> <p>«21» апреля 2023 г.</p>
Взамен ивл. №	<p><b>РАЗРАБОТАНО</b></p> <p>Профессор, зав. кафедрой «Инженерная химия и естествознание» ФГБОУ ПГУПС, д.т.н., В.Я. Соловьева</p>
Подпись и дата	<p>Зав. исп. лабораторией АИИТЦ «Сократ», к.т.н., доцент М.В. Степанова</p> <p>Аспирант кафедры «Инженерная химия и естествознание» ПГУПС  Ф.М. Шварц</p>
Ивл. № подл.	<p>Санкт-Петербург 2023</p>

Настоящие технические условия распространяются на «комплексную химическую добавку» для бетонов и строительных растворов, далее добавку, представленную водным раствором поликарбоксилатных полимеров, модифицированными веществами органической и неорганической природы в соответствии с ГОСТ 24211, в том числе нанодисперсиями наноразмера ( $10^{-5}$  –  $10^{-7}$ ) м диоксида кремния.

Добавка по основному эффекту действия является:

- суперпластифицирующей;
- стабилизирующей;
- регулирующей сохраняемость подвижности;
- повышающей прочность в проектном возрасте;
- снижающей проницаемость;
- повышающей морозостойкость;
- повышающей коррозионную стойкость.

Добавка рекомендуется для всех видов бетона:

- самоуплотняющихся
- высокопрочных;
- мелкозернистых;
- армированных, в т.ч. предварительно-напряженных;
- строительных растворов.

Добавка может использоваться для самоуплотняющихся бетонных смесей повышенной подвижности и бетонов на их основе, а также для бетонов разной плотности, в том числе армированных.

Твердение строительного бетона разной плотности, раствора с добавкой может осуществляться в естественных условиях, при положительной

	+Подпись и						
	Инва. № дубл.						
	Взамен инв. №						
	Подпись и дата						
Инва. № подл.					ТУ 20.59.59-007-985 93931-2023		
	Изм	Лист	№ докум	Подпись		Дата	
	Разраб.		Шварц Ф.М.				
	Пров.		Соловьева В.Я.				
	Н. контр.		Степанова И.В.				
	Утв.		Титова Т.С.				
					Комплексная химическая добавка для бетонов и строительных растворов Технические условия		
					Стадия	Лист	Листов
					A	2	13

температуре,  $\geq 5^{\circ}\text{C}$  при обеспечении влажности  $\geq 80\%$  и в тепловлажностных условиях.

Добавка характеризуется отсутствием агрессивных ионов хлора,  $\text{Cl}^-$ ; и сульфат ионов,  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Пример условного обозначения при заказе: «Комплексная химическая добавка для бетонов и строительных растворов» по ТУ 20.59.59-007-985 93931-2023.

Перечень нормативных документов, на которые имеются ссылки в настоящих технических условиях, приведен в Приложении 1.

### 1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

1.1. Добавка должна изготавливаться в соответствии с требованиями ГОСТ 24211 и настоящих технических условий, и по технологическому регламенту, утвержденному в установленном порядке.

1.2. По физико-химическим свойствам добавка должна соответствовать требованиям и нормам, указанным в таблице 1.

Таблица 1

Физико-химические свойства Добавки

№ п/п	Наименование показателя	Норма	Методы испытаний
1	Внешний вид	однородная жидкость светло-коричневого цвета	Визуально
2	Концентрация ионов водорода, ед. рН	$6,5 \pm 0,5$	п. 4.6
3	Плотность $\text{кг/м}^3$ , не менее	$1,030 \pm 0,005$	п. 4.5 и ГОСТ 18329 п. 4.6
4	Массовая доля сухих веществ в жидкости масс.%, не менее	13,0	п. 4.5

ТУ 20.59.59-007-985 93931-2023

Лист

3

Ив. № подл.	Подпись и дата
Взамен инв. №	Ив. № дубл.
Подпись и дата	Подпись и дата

Изм.	Кол.	Лист	№ док	Подп	Дата
------	------	------	-------	------	------

1.3. По технической эффективности (критериям эффективности) добавка по основному эффекту действия является суперпластифицирующей, стабилизирующей (улучшающей связность бетонной и растворной смеси), повышающей прочность бетона в проектном возрасте а также понижающей проницаемость бетона и раствора, увеличивая водонепроницаемость, морозостойкость и коррозионную стойкость бетона и раствора относительно агрессивных сред.

1.3.1. Эффективность действия добавки оценивается по критериям эффективности по ГОСТ 30459-2008 при предварительном определении оптимальной дозировки добавки.

1.3.2. Добавка считается пригодной к применению, если она удовлетворяет требованиям по эффективности, представленным в таблице 2.

Таблица 2

Оценка эффективности действия комплексной химической добавки» при ее использовании для бетонов.

№ п/п	Наименование показателей качества	Критерий эффективности	Методы испытаний
1	3	4	5
1	Оптимальная дозировка, % от массы цемента	1,0±0,2	ГОСТ 30459 п.39
2	Удобоукладываемость по расплыву конуса	увелич. подвижность б/смеси 36 до 65 см	ГОСТ Р 59715 п.5
3	Раствороотделение, не более %	15%	ГОСТ ГОСТ Р 59715 п.8.2
4	Сохраняемость живучести бетонной смеси мин. не менее	120	ГОСТ 10181
5	Повышение водонепроницаемости	≥ 2 марки	ГОСТ 12730.5
6	Повышение морозостойкости, цикл, не менее,	100	ГОСТ 10060-2012
7	Повышение коррозионной стойкости по отношению к действию агрессивных сред	Коэффициент хим стойкости ≥ 0,8	ГОСТ 30459
8	Повышение прочности на сжатие в проектном возрасте, %	≥30%	ГОСТ 30459

Изм.	Кол.	Лист	№док	Подп	Дата



опасности (малоопасные вещества) по ГОСТ 12.1.007-76. Добавка обладает слабо раздражающим действием на кожные покровы и слизистую глаза.

2.3. Эффективная удельная активность природных радионуклидов ( $A_{эфф.}$ ) в сырьевых компонентах и готовой продукции, должна соответствовать 1 классу радиационного качества строительных материалов ( $A_{эфф.} \leq 370$  Бк/кг) по СП 2.6.1.758-99 (НРБ-99).

2.4. Все транспортные и перегрузочные работы при приготовлении добавки и ее применении должны быть механизированы. По санитарно-гигиеническим и эпидемиологическим показателям производство соответствует требованиям СП 2.2.2.1327-03.

2.5. К производству и применению добавки допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний в соответствии с действующими приказами министерства здравоохранения социального развития РФ.

2.6. Работающие на производстве добавки, а также при отборе проб, получении и применении добавки должны пользоваться средствами защиты по ГОСТ 12.4.001-80 и ГОСТ 12.4.103-83.

2.7. Растворы на основе добавки не представляют опасности при эксплуатации по ГОСТ ГН 2.2.5.ВВ. ПН 2.2.5.2308.

2.8. В целях охраны атмосферного воздуха на предприятии необходимо организовать контроль за предельно допустимыми выбросами (ПДВ) в соответствии с требованиями ГОСТ 17.23.02-78.

2.9. Производственные сточные воды в процессе изготовления добавки не образуются.

2.10. Сбор, хранение, вывоз и утилизация отходов, образующихся в процессе изготовления и применения добавки необходимо осуществлять в соответствии с СанПиН 2.1.7.1322-03.

Инд. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №	Инд. № дубл.	Подпись и дата	Инд. № подл.	Изм.	Кол.	Лист	№ док	Подп	Дата	ТУ 20.59.59-007-985 93931-2023	Лист
													6



#### 4. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

4.1. **Отбор проб должен производиться методами**, установленными ГОСТ 6732-89. Масса средней лабораторной пробы должна быть не менее 500 г. Перед каждым анализом среднюю пробу тщательно перемешивают.

4.2. **Внешний вид добавки оценивают** визуально.

4.3. Определение показателя концентрации водородных ионов (рН).

Концентрацию водородных ионов рН определяют при помощи рН-метра лабораторного типа в соответствии с инструкцией, прилагаемой к прибору.

4.4. **Определение плотности добавки:**

а) при помощи весового метода.

4.4.1. Применяемая аппаратура

- весы лабораторные технические – 3 кл. точности с наибольшим пределом взвешивания 1 кг,
- цилиндр стеклянный по ГОСТ 25336-82 вместимостью 100 см<sup>3</sup>.

4.4.2. Проведение испытаний.

Испытуемую пробу добавки тщательно перемешивают. Отбирают пробу добавки в количестве 100 см<sup>3</sup>. Взвешивают добавку с точностью ±0,2 г.

4.4.3. Обработка результатов.

Плотность добавки ( $\rho$ ) в кг/м<sup>3</sup> вычисляют по формуле:

$$\rho = (a/100) \cdot 1000, \text{ где}$$

$a$  – масса добавки, г

100 – объем добавки, см<sup>3</sup>

б) с помощью ареометра «АОН – 1» по ГОСТ 18481-81.

4.5. **Определение массовой доли сухих веществ в жидкой фазе.**

4.5.1. Применяемая аппаратура:

шкаф сушильный электрический общего назначения по ОСТ 16.00.801.397-87;

- весы лабораторные аналитические по ГОСТ 24104-2001 2 кл. точноности с наибольшим пределом взвешивания до 200 г.;

Инд. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №	Инд. № дубл.	Подпись и дата	ТУ 20.59.59-007-985 93931-2023						Лист
											8
Изм.	Кол.	Лист	№ док	Подп	Дата						

- чашки фарфоровые по ГОСТ 9147-80;
- воронки, цилиндры и мерные колбы стеклянные по ГОСТ 1770-74 вместимостью 10 см<sup>3</sup>;
- фильтры по ГОСТ 12026-76;
- эксикатор по ГОСТ 25336-82.

#### 4.5.2. Проведение испытаний.

Испытуемую добавку в количестве 5 г. отфильтровывают при помощи фильтра. Остаток на фильтре промывают до исчезновения коричневой окраски. Фильтрат в фарфоровых чашках упаривают на водяной бане, затем ставят в сушильный шкаф и сушат при температуре  $(105 \pm 0,2) ^\circ\text{C}$ . Затем чашку с навеской охлаждают в эксикаторе 30 мин. и взвешивают. Остаток сушат в сушильном шкафу до постоянной массы.

– весы лабораторные аналитические по ГОСТ 24104-2001 2 кл. точности с наибольшим пределом взвешивания до 200 г.;

- чашки фарфоровые по ГОСТ 9147-80;
- воронки, цилиндры и мерные колбы стеклянные по ГОСТ 1770-74 вместимостью 10 см<sup>3</sup>;
- фильтры по ГОСТ 12026-76;
- эксикатор по ГОСТ 25336-82.

#### 4.5.2. Проведение испытаний.

Испытуемую добавку в количестве 5 г. отфильтровывают при помощи фильтра. Остаток на фильтре промывают до исчезновения коричневой окраски. Фильтрат в фарфоровых чашках упаривают на водяной бане, затем ставят в сушильный шкаф и сушат при температуре  $(105 \pm 0,2) ^\circ\text{C}$ . Затем чашку с навеской охлаждают в эксикаторе 30 мин. и взвешивают. Остаток сушат в сушильном шкафу до постоянной массы.

Инд. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №	Инд. № дубл.	Подпись и дата	ТУ 20.59.59-007-985 93931-2023						Лист
											9
Изм.	Кол.	Лист	№ док	Подп	Дата						

#### 4.5.3. Обработка результатов.

Массовую долю сухих веществ (X) в процентах вычисляют по формуле:

$$X = (A_1/A) \cdot 100,$$

где  $A_1$  – масса высушенного фильтрата, г.;

$A$  – масса навески, г.

За результат испытаний принимается среднее арифметическое из двух определений, округленное до 0,1%. Допускаемое расхождение между результатами параллельных определений не должно превышать 0,5%.

4.6. **Санитарно-гигиеническую оценку добавок** осуществляют уполномоченные органы Минздрава РФ по методикам Минздрава РФ.

Оценку эффективности добавок в композиционных бетонных и растворных смесях, а также в композиционных материалах, бетонах и строительных растворах осуществляют по показателям, указанным в ТЗ на исследуемые материалы, в соответствии с ГОСТ 30459-2008, ГОСТ 5802-86, ГОСТ 7473-2010, ГОСТ 10060-2012, ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 10181-2014, ГОСТ 12730.5-2018, ГОСТ 24211-2008, ГОСТ 28013-98, ГОСТ 23732-2011.

Правильность маркировки и упаковки добавки определяется визуально.

### 5. ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ

5.1. Добавку следует хранить в закрытой таре, исключая попадание посторонних веществ и атмосферных осадков при температуре не ниже 0°C.

5.2. Добавку перевозят транспортом любого вида, обеспечивающим сохранность тары от механических повреждений по ГОСТ 10674-82, ГОСТ 10935-97 в соответствии с правилами перевозки грузов, действующими на соответствующих видах транспорта.

### 6. УКАЗАНИЕ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

6.1. Технологическая схема введения добавки в бетоны и растворы должна обеспечивать возврат отходов добавки в бачки для рабочего раствора добавки.

Инд. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №	Инд. № дубл.	Подпись и дата							Лист 10
					ТУ 20.59.59-007-985 93931-2023						
Изм.	Кол.	Лист	№ док	Подп	Дата						

6.2. Запрещается сбрасывать или сливать в водоемы санитарно-бытового использования и в канализацию добавку в виде раствора, а также отходы, образующиеся от промывки тары хранения, подачи и дозирования добавки. При разливе раствора добавки необходимо его засыпать опилками и убрать в контейнер для мусора.

## 7. ГАРАНТИИ ИЗГОТОВИТЕЛЯ

7.1. Изготовитель обязан производить добавку в соответствии с требованиями настоящих ТУ, обеспечивая стабильное значение водородного показателя, рН, и плотность раствора.

7.2. Гарантийный срок хранения добавки – 12 месяцев. Возможность использования добавки после окончания гарантийного срока следует определять после ее испытания в бетоне.

Инва. № подл.	Подпись и дата	Взамен инв. №	Инва. № дубл.	Подпись и дата		
Изм.	Кол.	Лист	№док	Подп	Дата	ТУ 20.59.59-007-985 93931-2023
						Лист 11

**Перечень нормативных документов, на которые даны ссылки в  
технических условиях**

СанПин 2.1.7.1322-03 Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления».

СП 2.2.2.1327-03 «Гигиенические требования к организации технологических процессов, производственному оборудованию и рабочему инструменту»

ГН 2.2.5.1313-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны»

ГН 2.2.5.2308-07 «Ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) вредных веществ в воздухе рабочей зоны»

СП 2.6.1.758-99 «Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99)»

ГОСТ 12.4.001 – 80 ССБТ. Очки защитные. Термины и определение.

ГОСТ 12.4.103 – 83 «ССБТ. Одежда специальная защитная, средства индивидуальной защиты ног и рук. Классификация»

ГОСТ 12.1.007 – 76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности»

ГОСТ 17.23.02-78 «Охрана природы. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями»

ГОСТ 1770-74 «Посуда мерная лабораторная стеклянная»

ГОСТ 5802 – 86 «Растворы строительные. Методы испытаний»

ГОСТ 7473-2010 «Смеси бетонные. Технические условия»

ГОСТ 9147-80 «Посуда и оборудование лабораторные»

ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости».

ГОСТ 10180 – 2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам»

ГОСТ 10181 – 2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний»

Изм.	Кол.	Лист	№ док	Подп	Дата	ТУ 20.59.59-007-985 93931-2023	Лист
							12

ГОСТ 10674 – 82 «Вагоны – цистерны магистральных ж/дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия».

ГОСТ 10935 – 97 «Вагоны грузовые крытые магистральных ж/дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия»

ГОСТ 12026-76 «Бумага фильтровальная лабораторная»

ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости»

ГОСТ 18481-81 «Ареометры и цилиндры стеклянные. Технические условия».

ГОСТ 23732 – 2011 «Вода для бетонов и растворов. Технические условия»

ГОСТ 24104-2001 «Весы лабораторные. Общие технические требования»

ГОСТ 24211 – 2008 «Добавки для бетонов. Общие технические требования»

ГОСТ 25336 – 82 «Посуда и оборудование лабораторные стеклянные. Типы, основные параметры и размеры»

ГОСТ 26633 – 2012 Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия»

ГОСТ 27006 – 2019 «Бетоны. Правила подбора состава»

ГОСТ 28013 – 98 «Растворы строительные. Общие технические условия»

ГОСТ 30108 – 94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов»

ГОСТ 30459 – 2008 «Добавки для бетонов. Методы определения эффективности».

ГОСТ Р 59714-2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия»

ГОСТ Р 59715- 2022 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний»

Подпись и дата															
Инв. № дубл.															
Взамен инв. №															
Подпись и дата															
Инв. № подл.															
													ТУ 20.59.59-007-985 93931-2023	Лист 13	