

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

На правах рукописи

Касаткин Сергей Петрович

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ БЕТОН, МОДИФИЦИРОВАННЫЙ  
КОМПЛЕКСНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ДОБАВКОЙ, СОДЕРЖАЩЕЙ  
НАНОДИСПЕРСИИ ГИДРОДИОКСИДА КРЕМНИЯ**

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  
2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ПОСТАНОВКА РАБОТЫ. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	11
1.1 Современные представления и основные принципы получения высокоэффективного бетона.....	11
1.2 Добавки в бетоны и их влияние на структуру и свойства цементного камня.....	14
1.3 Применение микро- и нанодисперсий для модификации бетона.....	20
1.4 Постановка работы.....	27
1.5 Методы исследований и испытаний.....	28
1.6 Статистическая обработка данных.....	31
ГЛАВА 2. СОЗДАНИЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО БЕТОНА.....	33
2.1 Определение природы компонентов для создания комплексной химической добавки и оценка эффективности их действия относительно бетонной смеси и бетона.....	33
2.2 Выводы по главе.....	44
ГЛАВА 3. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНА И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ГИДРАТАЦИИ БЕТОНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО КОМПЛЕКСНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ДОБАВКОЙ.....	45
3.1 Определение показателей прочности и трещиностойкости бетона, модифицированного разработанной комплексной химической добавкой.....	45
3.2 Сравнительная оценка долговечности бетона.....	55
3.2.1 Оценка морозостойкости бетона.....	55
3.2.2 Оценка водонепроницаемости бетона.....	59

3.2.3 Оценка химической стойкости бетона.....	61
3.3 Комплексные физико-химические исследования продуктов гидратации затвердевшего бетона .....	63
3.4 Выводы по главе.....	66
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА К ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЮ .....	68
4.1 Оценка прочности и трещиностойкости стоек опор ВЛ.....	68
4.1.1 Расчёт показателей прочности и трещиностойкости вибрированной стойки СВ95-3с.....	71
4.1.2 Расчёт показателей прочности и трещиностойкости центрифугированной стойки СК26.1-1.1.....	83
4.2 Выводы по главе.....	95
ГЛАВА 5. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЙ ВЫПУСК. СХОДИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЁТОВ.....	97
5.1 Опытно-промышленный выпуск и определение физико-механических характеристик вибрированных стоек СВ95-3с .....	97
Заключение .....	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	107
Приложение А. Статистическая обработка показателей прочности бетона опытно-промышленного изготовления, модифицированного разработанной добавкой .....	121
Приложение Б. Акт о проведении опытно-промышленных исследований бетона, модифицированного комплексной химической добавкой.....	122
Приложение В. Технические условия (проект) на комплексную химическую добавку .....	124

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы диссертационного исследования.**

В разных областях строительства востребованы бетоны, которые характеризуются улучшенными показателями качества, обладают повышенной эксплуатационной надёжностью, т.е. высокой прочностью, повышенной устойчивостью к трещинообразованию, морозостойкостью, высокой сопротивляемостью атмосферным воздействиям, например, перепаду температур, осадкам в виде мокрого снега или дождя и другим негативным факторам.

Бетон является многокомпонентной системой, при твердении которого протекают химические процессы, что обеспечивает образование новых гидратных фаз и новых контактов в бетонной системе.

По-нашему мнению – формирование физико-механических характеристик бетона взаимосвязано с образованием новых комплексных гидратных соединений, обладающих такими характеристиками, как твёрдость, прочность, пониженная растворимость и при этом, имеющих определённую кристаллизационную структуру, которая также оказывает принципиальное влияние на физико-механические свойства бетона.

Для образования гидратных фаз, обладающих уникальным сочетанием указанных свойств требуется целенаправленное воздействие на бетонную систему веществами определённой природы и усиление процессов гидратации. Для этого целесообразно создать и использовать новую комплексную химическую добавку, которая повысила бы реакционную активность компонентов системы и обеспечивала бы образование повышенного количества новых гидратных фаз, оказывающих положительное влияние на создание высокопрочного бетона и при этом, обладающего повышенной устойчивостью к трещинообразованию на протяжении всего периода формирования структуры бетона, и при этом бетон должен отличаться повышенной долговечностью.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Теоретическими основами научного исследования являются труды отечественных и зарубежных учёных в области теории и практики цементсодержащих систем, а также в создании высокофункциональных бетонов, представленные в работах М.М. Сычёва, А.Ф. Полака, Т.В. Кузнецовой, В.Б. Ратинова, Ю.М. Баженова, В.Г. Хозина, П.Г. Комохова, Л.Б. Сватовской, В.В. Бабкова, В.Ф. Степановой, В.М. Латыпова, И.В. Недосеко, В.П. Попова, Ю.В. Пухаренко, В.Я. Соловьёвой, Б.Я. Трофимова, В.В. Прокофьевой, А.М. Харитоновой, Л.Я. Крамар и др., и труды научно-исследовательских и проектных институтов.

При всей значимости результатов научных исследований, необходимо отметить, что некоторые вопросы по обозначенным нами проблемным аспектам, а именно, по созданию высокопрочного бетона повышенной трещиностойкости в присутствии высокоэффективных комплексных химических добавок, содержащих, например, нанодисперсии диоксида кремния, изучены недостаточно полно.

Имеются работы по использованию микрокремнезёма в сочетании с поверхностно-активными веществами, которые в соответствии с химической природой оказывают положительное влияние на улучшение свойств искусственного камня, но эффективность их действия в результате ограниченной реакционной активности не обеспечивает создание бетона нового уровня свойств, разработке которого и посвящено данное научное исследование.

### **Цель и задачи исследования.**

*Цель работы* – разработать комплексную химическую добавку, содержащую нанодисперсии гидроксида кремния, для создания высокоэффективного бетона повышенной долговечности..

*Объект исследования* – бетоны, модифицированные новой комплексной химической добавкой.

*Предмет исследования* – исследовать изменение комплекса физико-механических показателей бетона: прочности на сжатие, на растяжение при изгибе, на осевое растяжение, призмной, модуля упругости,

водопоглощения, водонепроницаемости, морозостойкости и химической стойкости бетона в присутствии разработанной комплексной химической добавки, подтверждающих повышенную эксплуатационную надёжность бетона и повышенную долговечность.

*Задачи исследований:*

- 1 Выполнить анализ современных химических и минеральных добавок для бетонов и оценить эффективности их действия.
- 2 Определить природу компонентов для создания эффективной комплексной химической добавки, обладающей повышенным пластифицирующим эффектом действия, а также эффектом повышения прочности.
- 3 Определить физико-механические характеристики бетона с разработанной комплексной химической добавкой.
- 4 Исследовать продукты гидратации, образующиеся при твердении бетона с разработанной комплексной химической добавкой.
- 5 Провести опытно-промышленный выпуск комплексной химической добавки и бетона с её использованием, разработать проект технических условий на комплексную химическую добавку.

**Научная новизна исследования:**

- 1 Обоснован выбор природы компонентов для создания высокоэффективной комплексной химической добавки и показано, что нанодисперсии диоксида кремния размером 50-70 нм при пониженном значении рН 3,5-4,0, обладают хорошей совместимостью с поликарбонатом, обеспечивая эффект пластифицирующего и реакционно-активного действия, обеспечивая создание высокопрочного бетона, обладающего повышенной прочностью на растяжение при изгибе.
- 2 Впервые установлено, что поликарбонатный полимер на основе ангидрида малеиновой кислоты вступает в химическое взаимодействие с калиевыми солями высших жирных кислот при обязательном присутствии портландцемента, образуя общие разветвлённые цепи начиная с раннего возраста, что подтверждено данными ИК-спектроскопических исследований: на ИК-спектре

поликарбоксилата появляются новые полосы поглощения в области 1349-1241 см<sup>-1</sup>, которые соответствуют появлению новых связей  $\overset{|}{\underset{|}{\text{C}}}-\text{O}^-$  (1349 см<sup>-1</sup>, деформационные колебания) и  $-\overset{|}{\underset{|}{\text{C}}}-\text{O}-\overset{|}{\underset{|}{\text{C}}}-$  (1241 см<sup>-1</sup>, валентные колебания), образование которых оказывает положительное влияние на повышение трещиностойкости бетона с раннего возраста.

3 Определено, что продукты гидратации бетона с комплексной химической добавкой отличаются пониженным содержанием Ca(OH)<sub>2</sub>, повышенным содержанием тоберморитоподобных гидросиликатов кальция типа CSH(I) и образованием новых фаз типа афвиллита 3CaO·2SiO<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O и окенита 3CaO·6SiO<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, кристаллизующихся в виде удлинённых волокон и отличающихся повышенной твёрдостью.

По результатам исследований получено 5 патентов.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

1 Показано, что бетон с разработанной комплексной химической добавкой относительно контрольного состава характеризуется уменьшением величины водопоглощения на 34 % до значения W<sub>M</sub>=2,7 %, повышением прочности: на сжатие на 61 % и в большей степени повышением прочности на растяжение при изгибе на 87 % и на осевое растяжение на 64 %.

2 Определено, что показатели долговечности бетона с разработанной комплексной химической добавкой значительно улучшаются: водонепроницаемость увеличивается не менее чем на 50 % до марки W16, морозостойкость соответствует марке F<sub>1</sub>≥600, K<sub>ХС</sub>≥0,86. В соответствии с СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии» достигнутые показатели обеспечивают срок службы, например, железобетонных конструкций воздушных линий (ВЛ) электропередачи не менее 100 лет в большинстве возможных сред эксплуатации.

3 Расчётно-экспериментальным путём определено, что для бетона с комплексной химической добавкой допускаемый изгибающий момент увеличивается до 23 %, обеспечивая уменьшение ширины раскрытия трещин на 19-

22 %. Улучшение указанных параметров обеспечивает возможность уменьшения степени армирования в пределах 27 %, оказывая положительное влияние на снижение себестоимости конструкций.

4 Осуществлён опытно-промышленный выпуск разработанной комплексной химической добавки, которая использована для изготовления 30 партий предварительно напряжённых центрифугированных и вибрированных стоек для опор ВЛ. Статистическая обработка полученных результатов по показателю прочности показала, что средний коэффициент вариации прочности  $\bar{V}$  составил 5,6 %. Физико-механические показатели бетона опытно-промышленного и научно-экспериментального изготовления имеют хорошую сходимость, что положено в основу разработки проекта ТУ на комплексную химическую добавку.

#### **Методология и методы исследования.**

Методологической основой диссертационного исследования являются основные положения теории твердения бетонов в присутствии добавок разной природы, а также физико-химические исследования продуктов гидратации, образующихся при твердении бетона, в присутствии разработанной комплексной химической добавки и, как следствие, влияние продуктов гидратации на физико-механические показатели бетона. Обработка результатов экспериментальных исследований выполнена с использованием статистической обработки экспериментальных данных. При исследовании фазового состава модифицированного бетона применялись методы рентгенофазового, дифференциально-термического и ИК-спектроскопического методов анализа.

#### **Область исследования**

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 2.1.5 – Строительные материалы и изделия, п. 5 «Разработка и внедрение способов активации компонентов строительных смесей путём использования физических, химических, механических и биологических методов, способствующих получению строительных материалов с улучшенными показателями структуры и свойств» и п. 10 «Разработка новых и



совершенствование существующих методов повышения стойкости строительных материалов, изделий и конструкций в условиях воздействия физических, химических. и биологических агрессивных сред на всех этапах жизненного цикла».

### **Положения, выносимые на защиту:**

1 Обоснование выбора природы компонентов для комплексной химической добавки, обеспечивающей создание высокопрочного бетона повышенной эксплуатационной надёжности и долговечности.

2 Основные физико-механические характеристики бетона с разработанной комплексной химической добавкой.

3 Результаты физико-химических исследований продуктов гидратации, образующихся при твердении бетона с разработанной комплексной химической добавкой.

4 Опытное-промышленное апробирование разработанной комплексной химической добавки и бетона с добавкой при изготовлении опор ВЛ по технологии вибрирования и центрифугирования и сравнительные физико-механические показатели бетона с разработанной комплексной химической добавкой опытно-промышленного изготовления и научно-экспериментального исследования.

**Достоверность результатов** и обоснованность выводов обеспечиваются достаточным объёмом воспроизводимых экспериментальных данных, получаемых при помощи современных методов исследования, их взаимной корреляцией, использованием статистической обработки экспериментальных данных.

Выводы и данные научно-экспериментальных исследований подтверждены хорошей сходимостью с результатами опытно-промышленных исследований и выпуском опытно-промышленной партии стоек опор ВЛ из бетона с разработанной комплексной химической добавкой.

**Апробация работы.** Результаты научного исследования докладывались на международной научно-практической конференция «Опоры и фундаменты для умных сетей: инновации в проектировании и строительстве», г. Москва, декабрь 2017, на научно-практических конференциях: «Международная научно-

практическая конф. ПГУПС Императора Александра I, каф. «Инженерная химия и естествознание» г. С-Пб, 2017 и «Опоры и фундаменты для умных сетей: инновации в проектировании и строительстве», г. С-Пб, июль 2017.

**Внедрение результатов.** Произведён выпуск опытно-промышленной партии опор ВЛ из бетона с разработанной комплексной химической добавкой по технологии вибрирования и центрифугирования на заводе ООО «Рыбинскэнергожелезобетон» (г. Рыбинск 2021 г).

**Личный вклад автора** заключается в теоретическом обосновании эффективности использования поликарбоната на основе ангидрида малеиновой кислоты в сочетании с солями калия высших жирных кислот и нанодисперсиями диоксида кремния для создания высокоэффективной комплексной химической добавки, использование которой позволило получить бетон повышенной прочности, трещиностойкости и долговечности; проведении научно-экспериментальных и опытно-промышленных исследований по созданию высокопрочного бетона, проведении расчётов показателей прочности и деформативности железобетонных центрифугированных и вибрированных стоек опор ВЛ и технико-экономической эффективности создания конструкций из бетона повышенной долговечности с разработанной комплексной химической добавкой.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 15 статей, в том числе 8 статей опубликованы в изданиях, входящих в перечень научных изданий, рецензируемых ВАК РФ, из них 1 статья в издании, входящем в наукометрическую базу Scopus. По теме диссертационного исследования получено 5 патентов РФ на изобретение.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы, включающего 117 наименований. Общий объём диссертации составляет 117 страниц основного текста. В работе представлены 3 приложения, 20 рисунок и 19 таблиц.

# ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ПОСТАНОВКА РАБОТЫ. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 1.1 Современные представления и основные принципы получения высокоэффективного бетона

В мировой строительной практике неуклонно растёт доля высокопрочных и высококачественных (высокоэффективных) бетонов (High performance concrete - НРС), используемых при создании новых конструкционных и архитектурных форм.

Термин «высокопрочный бетон» появился в начале 50-х годов прошлого века. Тогда под ним подразумевался бетон, прочность которого превышала марку цемента. В настоящее время в соответствии с ГОСТ 25192-2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования» высокопрочным считается бетон с классом прочности на сжатие В55 и более.

В соответствии с Европейским стандартом EN206-1, к техническому термину «высокопрочный бетон» относятся бетоны, классифицирующиеся по прочности С50/60 и выше. В этом обозначении индекс С означает обычный бетон. Первая цифра обозначает минимальную нормативную прочность на сжатие бетонного цилиндра диаметром 15 см и высотой 30 см. А вторая цифра – нормативную прочность на сжатие куба с длиной грани 15 см. Если бетон С50/60 по европейской классификации привязать к Российским стандартам, то класс высокопрочного бетона по прочности на сжатие будет соответствовать В60 и выше, но ещё в 1987 г, в рекомендациях по технологии изготовления конструкций из высокопрочных бетонов [77] под термином «высокопрочный бетон» понимался бетон класса прочности на сжатие В45 и более.

Наибольшая эффективность высокопрочных бетонов наблюдается в конструкциях, работающих на сжатие, в которых возможно сокращение объёма бетона и арматурной стали. Особенно целесообразно применять такой бетон в изгибаемых предварительно напряжённых конструкциях с облегчёнными сечениями (тавровыми, пустотелыми и др.), где в сжатой зоне поперечных сечений

возникают значительные сжимающие напряжения, а также при повышении класса арматуры в растянутой зоне поперечных сечений элементов конструкций. Немаловажную роль высокопрочный бетон играет в уменьшении массы и металлоёмкости тонкостенных конструкций с большими перерезывающими усилиями, например балки пролётных строений мостов, участки монолитных перекрытий над колоннами и центрифугированные стойки опор ВЛ, где за счёт высокого расчётного сопротивления бетона на осевое растяжение  $R_{bt}$  возможно не только уменьшение поперечного армирования, но и уменьшение толщины конструкций [2; 3; 12; 13; 14; 25; 41; 79; 95; 98].

Концепция высококачественных бетонов впервые была сформулирована в 1986 году, а основные требования к ним сформулированы Федеральным управлением автострад США в 1990 году в «Программе стратегических исследований в области автострад». Высококачественные бетоны, изготавливаемые из высокоподвижных и литых бетонных смесей с ограниченным водосодержанием, должны иметь прочность на сжатие в возрасте двух суток 30 - 50 МПа, в возрасте 28 суток – 60-150 МПа, морозостойкость  $F_{1600}$  и выше, водонепроницаемость  $W$  12 и выше, водопоглощение менее 1-2 % по массе, истираемость не более 0,3-0,4 г/см<sup>2</sup>, регулируемые показатели деформативности, в том числе с компенсацией усадки в возрасте 14-28 суток естественного твердения, высокую газонепроницаемость. В большинстве реальных условий эксплуатации прогнозируемый срок службы такого бетона будет превышать 200 лет. Возможно получение и супердолговечных бетонов со сроками службы до 500 лет, что подтверждается исследованиями японских ученых. [5]

Над концепцией НРС работали такие зарубежные учёные как S.W. Forster, P.-C. Aitcin [112; 114]. Они описывали НРС как «инженерный» бетон с улучшенными одним или несколькими параметрами качества, компоненты которого подбираются путём обоснованного отбора. При обсуждении термина НРС А.М. Невилль и P.-C. Aitcin и другие указывали на то, что при практическом использовании таких бетонов наибольшее внимание уделяется деформационным и эксплуатационным

свойствам, таким как высокий модуль упругости, высокая плотность, низкая проницаемость и высокая коррозионная стойкость. [68; 111].

Требования к высокоэффективным бетонам в настоящее время включены в стандарты международных организаций RILEM, FIB, ASCE, ACI, а также в ряд национальных стандартов. [106]

Как видно из зарубежной литературы, в настоящее время из высококачественных бетонов массово производят мосты, тоннели, покрытия дорог, высотные сооружения, морские платформы газо-и нефтедобычи и другие объекты специального назначения. Можно прогнозировать, что в ближайшем будущем в России будет происходить постепенное замещение обычных бетонов на высококачественные (высокоэффективные) с использованием многокомпонентных составов, которые включают в себя комплексные модификаторы из множества химических добавок, а также минеральные компоненты, в том числе активные, различной дисперсности ( $2000-30000 \text{ см}^2/\text{г}$ ) и дисперсные волокнистые наполнители (стекловолокно, базальтоволокно, полипропиленовая, углеродная фибра и т.д.). [91]

В процессе научных исследований установлено [11], что многокомпонентность бетонной смеси позволяет управлять структурообразованием на всех этапах формирования цементного камня и получать материалы с необходимым комплексом свойств.

К материалам, используемым для приготовления высокопрочного бетона, предъявляются повышенные требования, при этом целесообразно осуществлять получение требуемых свойств при минимальных экономических затратах. Для достижения заданных свойств состав бетона в зависимости от применяемых химических и минеральных добавок должен корректироваться.

В качестве вяжущего рекомендуется использовать портландцемент с наибольшей активностью и наименьшей нормальной плотностью. Рекомендуются цементы с нормальной плотностью не более 25-26 % и активностью не менее  $500-600 \text{ кг/см}^2$ .

Таблица 1.1 – Структура потребления цемента по основным маркам в России и в бывшем СССР

Годы	M300	M400	M500	M550	M600
2004-2005	0,4	66,2	32,6	0,4	0,4
Середина 80-х гг.	13,8	62,8	22,1	0,8	0,5

Как видно из таблицы 1.1, низкомарочный цемент M300 практически перестал пользоваться спросом. Цементы высоких марок M550 и M600, а также M700 имеют ограниченный спрос по причине высокой стоимости и используются при строительстве военных сооружений и объектов особого назначения.

Для приготовления высокопрочных бетонов, начиная с класса B60 включительно, рекомендуется применять чистые крупно- или среднезернистые пески природной гранулометрии (без фракционирования).

В качестве крупного заполнителя в высокопрочных бетонах применяют щебень, получаемый дроблением прочных плотных горных пород. Рекомендуется применять щебень прочностью на сжатие в водонасыщенном состоянии не менее чем в полтора раза выше прочности бетона и не менее марки по дробимости 1200. Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой форм в щебне для бетонов классов по прочности на сжатие B60 и выше не должно превышать 15 % массы.

## **1.2 Добавки в бетоны и их влияние на структуру и свойства цементного камня**

История строительства всегда была связана с модификацией свойств строительных материалов.

Большинство исследователей [4; 62; 71; 74; 85; 97], занимавшихся бетоноведением, считают, что для повышения прочности, прежде всего, необходимо снижение водоцементного отношения. Для этих целей использовались различные пластификаторы, которые в последнее время называют модификаторами бетона [46; 47; 52; 67; 75; 89; 104; 110 и др.].

Основное назначение пластификаторов – увеличение подвижности цементной и бетонной смеси, что обеспечивает уменьшение энерго- и трудозатрат

при укладке бетонной смеси в монолитные строительные конструкции, сборные железобетонные изделия, способствует интенсификации технологического процесса и повышению качества продукции.

В результате работ Шестоперова С.В., Рояка С.М., Малинина Ю.С. [80; 99; 107], в стране было организовано производство пластифицированного цемента, для получения которого применяли ССБ (сульфитно-спиртовую барду) в количестве 0,25 % от массы цемента, а также ЛСТ (лигносульфонаты) в количестве 0,25-0,35 % от массы цемента. Однако опыт производства показал, что пластификаторы даже в небольших количествах вызывают замедление процесса гидратации и твердения цементного камня вследствие слабой проницаемости воды через создаваемые ими адсорбционные слои на частицах цемента. Слои экранируют новообразования минералов цемента и их контакты друг с другом, соответственно прочность цементного камня и бетона ниже прочности бетона без добавок, следовательно требуется дополнительная модификация указанных добавок. [24; 57; 61; 84]

В 1960-е годы началось широкое применение суперпластификаторов на основе нафталинсульфонатов – продуктов конденсации сульфированного нафталина с формальдегидом, меламинсульфокислоты с формальдегидом, среди которых наиболее известна добавка С-3 [67]. Влияние С-3 на свойства цементов исследовалось А.И. Вовком [22], С.С. Каприеловым [45] и др. [30]. Исследования показали, что пластификаторы на основе С-3 могут адсорбироваться только на гидратных новообразованиях, адсорбция не происходит на безводных клинкерных минералах. Адсорбционную способность минералов увеличивает их предварительная гидратация. Наблюдается прямопропорциональная связь между степенью гидратации  $C_3S$  и количеством адсорбционного вещества.

В наибольшей степени пластифицирующий эффект достигается при введении пластификатора в бетонную смесь совместно с водой затворения. [19; 70] В этом случае адсорбция твёрдой фазы выше. После предварительной гидратации смеси адсорбция твёрдой фазы резко снижается.

Ю.М. Баженов считает [4; 5], что эффективность добавок зависит от способа ее введения в материал. Совместный помол цемента с суперпластификатором и

другими добавками позволяет уменьшить дозировку добавки по сравнению с ее введением в бетонную смесь за счёт увеличения эффекта воздействия на водопотребность смеси. Так, нормальная густота цементного теста снижается с 28 до 14%, а водопотребность бетонной смеси при одинаковой подвижности на 40-50%, в то время как при введении суперпластификатора непосредственно в бетонную смесь водопотребность уменьшается лишь на 20%.

Рассвет высотного строительства пришёлся на 1980-е года. Густота армирования стала увеличиваться. Сложность конструкций и решений потребовали создания бетонов, которые укладываются без виброуплотнения. В XXI веке строительство сложнейших архитектурных и инженерных сооружений стало возможным благодаря появлению добавок на основе эфиров поликарбоксилатов (СЭП или РСЕ), которые совершенствуются и в настоящее время.

В отличие от вышеперечисленных модификаторов, суперпластификаторы на основе СЭП прикрепляются к поверхности цементного зерна в основном точечно и характеризуются пространственным строением молекулы с разветвленными боковыми цепями, что способствует более эффективной диспергации цементных флокул за счет стерического эффекта, а также позволяет обеспечить доступ воды к клинкерным минералам.

В основе производства поликарбоксилатных суперпластификаторов заложен принцип химического модифицирования карбоксилсодержащих полимеров, позволяющий ввести в эти макромолекулы длинные или короткие боковые цепи, что позволяет создавать пластификаторы с контролируемой величиной адсорбции и пластифицирующего эффекта в зависимости от особенностей применяемого цемента и заполнителей, а также требований к бетонной смеси. Результатом такой модификации является возможность регулирования химических и физических свойств полимеров и их взаимодействия с частицами цемента за счёт изменения длины основной цепи и количества боковых цепей. Это делает суперпластификаторы на поликарбоксилатной основе наиболее перспективными модификаторами водоредуцирующего действия и открывает широкие горизонты



их использования для получения высококачественных цементных композитов строительного назначения [67; 27; 86;92].

Суперпластификаторы классифицируются по химическому составу и механизму действия см. табл. 1.2 [49; 67].

Таблица 1.2 – Классификация суперпластификаторов

Тип суперпластификатора	Полимерная основа	Механизм действия		Водоредуцирующий эффект, %	Относительная стоимость сухого полимера, %
		Электростатический	Стерический		
НФ	Сульфированный нафталинформальдегид	+++	+	15-25	30
МФ	Сульфированный меламинформальдегид	+++	+	15-25	70
ЛСТМ	Модифицированный лигносульфонат	+++	+	10-20	25
П	Полиоксид полиакрилат (акрилат)	++	++	20-30	80
ЭП	Полиоксид полиакрилат (акрилат) с привитым эфиром	++	+++	25-40	100

В настоящее время, при производстве высококачественных бетонов широко используются добавки, представленные высокоэффективными суперпластификаторами на базе эфиров полиакрилатов, производимые фирмами BASF, Sika, MC-Bauchemie и т.д. Основными качественными показателями таких добавок являются: степень водоредуцирования, сохраняемость (живучесть) бетонной смеси и ранняя прочность. Указанные добавки обладают рядом достоинств, которые заключаются, в основном, в повышении подвижности бетонной смеси и повышении прочности на сжатие бетона, но повышение таких свойств, как коррозионная стойкость или прочность на растяжение при изгибе, осуществляется, в основном, за счёт повышения плотности бетона и не относится к отличительным особенностям бетона.

В настоящее время при производстве бетона используются следующие пластифицирующие добавки:

- добавки на основе лигносульфонатов – могут использоваться для изготовления товарного бетона классов В7,5 ÷ В25, они обеспечивают сохранность бетонной смеси не менее 1,5 часов, оказывают умеренное пластифицирующее действие, увеличивая подвижность бетонной смеси от марки П1 до (П3-П4), отличаются низкой стоимостью;
- добавки на основе смеси лигносульфонатов и поликарбоксилатов – рекомендуются для изготовления товарного бетона классов В15 ÷ В35, обеспечивают сохранность бетонной смеси не менее 2 часов, отличаются невысокой стоимостью;
- нафталинформальдегидсульфонатные или меламинаформальдегидсульфонатные поликонденсаты - обеспечивают сохранность бетонной смеси не менее 2 часов, отличаются хорошей совместимостью с цементами различных производителей и с заполнителями разной природы.

В настоящее время, в отечественной практике, кроме пластифицирующих добавок фирм BASF, Sika, MC-Bauchemie, по-прежнему, продолжают использоваться такие пластификаторы как С-3, ЛСТ, ЦМИД, меламинаформальдегидные смолы, такие как 10-03, Melment, Piramin и др.

Химические добавки на основе ПАВ разной природы повышают качество бетонной смеси, способствуя уменьшению их расслаиваемости и обеспечивают повышение живучести бетонной смеси, что имеет принципиальное значение при производстве товарного бетона для монолитного строительства, но при этом стоит отметить, что на начальном этапе несколько задерживается рост прочности. [6; 10; 48; 49; 50; 56; 64; 82; 88] Эти добавки, вводимые в малых дозах (0,01-0,25 % от массы цемента), оказываются мощными регуляторами ряда важных свойств бетонов и растворов, например, Servon XB58 обладает пластифицирующе-воздухововлекающими свойствами, а Пеногаситель Ф-67 обеспечивает образование равномерной микропоровой структуры.

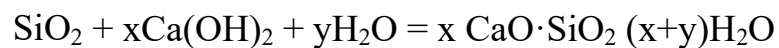
Вопросами создания напрягающих, расширяющихся и безусадочных цементов занимались многие исследователи. [1; 16; 35; 58; 66].

Широко распространено применение минеральных добавок (МД), обладающих вяжущими, расширяющими и пуццоланическими свойствами. Основное влияние тонкодисперсных МД, как пишет В.С. Рамачандран [72], связано либо с физическим эффектом, который связан либо с более мелким гранулометрическим составом по сравнению с цементом, либо с реакциями активных гидравлических составляющих.

По химической активности МД делятся на активные и инертные. Инертные МД, например, известняк, глина, кварцевый песок служат для изменения зернового состава и плотности бетона.

Активные МД (диатомит, опока, трепел, микрокремнезём и др.) вступают в реакцию с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и образуют соединения с вяжущими свойствами. Некоторые активные МД, например, доменный шлак, имеют свойство затвердевать самостоятельно при добавлении в смесь извести.

Особый интерес для получения бетонов повышенной прочности и долговечности представляют активные добавки с пуццоланическими свойствами, наиболее распространённым представителем которых является микрокремнезём. Весьма мелкий гранулометрический состав и значительная удельная поверхность зерен аморфного кремнезема обуславливают высокие пуццолановые свойства и позитивное влияние на свойства бетона. Кремнезем в таком виде способен вступать в реакцию с гидроксидом кальция, который образуется при реакции гидратации трёхкальциевого силиката с водой, повышая тем самым количество гидратированных силикатов типа CSH в результате реакции:



Темпы нарастания прочности обычного бетона с содержанием микрокремнезема слегка отличается по сравнению с современными бетонами на обычном портландцементе. Обычно через 7 дней он приобретает только 55-65% от 28-дневной прочности при выдерживании при температуре 20 °С. Основная пуццолановая активность, по-видимому, протекает между 7 и 20 днями. Микрокремнезем зачастую используется в сочетании с золой уноса и

гранулированным доменным шлаком для повышения скорости нарастания прочности.

### **1.3 Применение микро- и нанодисперсий для модификации бетона**

Повышение прочности вяжущих материалов при введении в их состав микронаполнителей, по мнению И.М.Красного [59], помимо гидравлической активности, обусловлено образованием наиболее мелкими зернами микронаполнителя (коллоидных размеров) центров кристаллизации в контактной зоне цемента.

Проведенные В.К.Власовым [21] экспериментальные исследования по введению в бетоны тонкодисперсных добавок, позволили сделать вывод о том, что в основе "эффекта микро-наполнителя" при формировании контактов системы лежат как химические процессы (взаимодействие с продуктами гидратации цемента), так и физико-химические явления (влияние поверхностной энергии частиц добавок и др.).

В настоящее время в строительстве начинают использоваться высокоэффективные добавки, в состав которых входят реакционно-активные нанодисперсии. Нанодисперсии имеют размер от 1 до 100 нм, и характеризуются сформированной поверхностью и, как следствие, высокой поверхностной энергией, которая придаёт особые свойства наночастицам. Наночастицы обладают повышенной скоростью движения внутри системы, в результате этого они способны диспергировать скопления или конгломераты минералов, портландцемента таким образом, дополнительно вовлекая их в гидратационные процессы, что повышает степень гидратации портландцемента. Кроме того, наночастицы способны проникать в поры соответствующего размера и уплотнять структуру формирующегося камня. За счёт высокой поверхностной энергии и повышенной скорости движения наночастицы характеризуются высокой реакционной активностью.

Использование нанодобавок и нанодисперсий, при производстве бетона и искусственного камня позволяет отнести данную технологию производства бетона к нанотехнологии [83].

Для цементных композитов нанообъектами первого уровня являются частицы с размером от 1 до 20 нм, и второго уровня – от 21 до 100 нм.

Комохов П.Г. [26, 53] приводит принципы построения строительных наносистем, которые включают три способа получения материалов:

1. «Сверху-вниз» - диспергирование, измельчение, глазурирование.
2. «Сверху-вниз» - конденсационный, система «золь-гель», образование геля с частицами до 100 нм через золь с атомно-молекулярными размерами частиц.
3. Применение природных фуллеренов и/или комплексных добавок на их основе с нанотрубками.

По мнению многих учёных [26, 53; 96], использование нанодисперсий для создания универсальных бетонов улучшенного качества и сверхповышенно долговечных является высокоэффективным и перспективным направлением.

Первое направление – технология домола цемента перед его использованием до наноразмерных частиц. У такого цемента будет значительно большей доля вещества, вступающего в реакцию с водой (у обычного цемента, удельная поверхность которого около  $S=3000 \text{ см}^2/\text{г}$ , в реакцию вступает лишь третья часть объема его частиц, преимущественно с поверхности, остальной объем выполняет в готовом изделии функцию инертного заполнителя). У домолотого цемента [78] частицы реагируют с водой на 80-90 % их объема. Следовательно, на получение заданного изделия цемента потребуется меньше. Домолотый цемент обеспечивает получение более прочных цементосодержащих структур, вследствие увеличения числа образующихся контактов и повышения прочности в результате образования повышенного количества новых комплексных гидратных соединений. [42; 60; 63; 69; 73].

Однако, увеличение удельной поверхности считается неэкономичным и не целесообразным, так как тонкодисперсные частицы обладают коагуляционным

действием, поэтому рационально производить активацию вяжущего в процессе приготовления бетонной смеси. [20]

Существуют различные способы, повышения трещиностойкости и долговечности бетонов:

- применение расширяющих цементов,
- разнообразные добавки, компенсирующие усадку,
- использование бетонов с комбинированным заполнителем и дисперсноармированных как минеральными, так и полимерными волокнами.

Образование трещин происходит в процессе испарения влаги. Потеря влаги приводит к усадке и трещинам. Примерная усадка цементного камня, который твердел в течение пяти лет, составляет около трёх миллиметров на один метр.

При компенсации усадки и предотвращении трещин необходимо руководствоваться основными требованиями. Применять смеси с низким содержанием цемента, использовать расширяющие добавки, а также применять кюринг – упрочнение бетона пропитками глубокого проникновения.

Сопротивление бетона осевому растяжению значительно меньше, чем сопротивление сжатию, и характеризуется нормальным сцеплением его составляющих. Малая прочность бетона при растяжении объясняется неоднородностью его структуры и разрушением сплошности бетона, что способствует развитию концентраций напряжений, особенно при действии растягивающих усилий. Установлено, что с ростом В/Ц сопротивление разрыву снижается, однако в меньшей степени, чем сопротивление сжатию. Увеличение содержания песка в бетонной смеси приводит к уменьшению прочности бетона на растяжение. [1]

Неоднородное строение бетона – одна из главных причин большого рассеяния результатов механических испытаний этого материала, что сказывается при экспериментальном определении величины растяжения гораздо сильнее, чем при определении прочности на сжатие. [15]

Трещины сцепления заполнителя и цементного камня возникают в процессе усадки цементного камня, преимущественно в контактах с крупными зёрнами заполнителя. [1]

Корректный подбор компонентов бетонной смеси, правильный выбор модификаторов для бетона, режима твердения и качественный уход за бетоном могут существенно снизить риск трещинообразования за счёт образования прочной мелкопористой структуры. [36; 37; 76]

В портландцементе около 75% по массе составляют два силиката кальция: трехкальциевый силикат C3S и  $\beta$ -двухкальциевый силикат  $\beta$ -C2S. При их гидратации получают гидросиликаты кальция и гидроксид кальция.

Для этих гидросиликатных фаз Taylor H.F.W. предложил обозначение [117], разделив C-S-H фазу на составляющие переменного состава, отличающиеся величиной отношения  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ . Для гидросиликатов кальция с отношением  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  изменяющимся от 0,8 до 1,5 используют обозначение C-S-H(I). Это слабозакристаллизованная или аморфная фаза переменного состава имеет несовершенную тоберморитоподобную структуру. Гидросиликаты C-S-H(I) стабильны при изменении pH среды от 13 до 6,5 с концентрацией CaO в жидкой фазе не менее 0,03 г/л [44; 107].

Гидросиликаты C-S-H(I) называются низкоосновными и кристаллизуются в виде тончайших пластинок (лепестков) толщиной  $\cdot 10^{-3}$  нм (2...3 молекулярных слоя), шириной  $40...50 \cdot 10^{-2}$  нм. Длина кристаллов может достигать нескольких десятков и даже сотен нанометров. Удельная поверхность этих частиц составляет 250...380 м<sup>2</sup>/г и характеризуется повышенными прочностными показателями. Цементный камень на основе C-S-H(I) имеет высокую прочность вследствие высокой развитости поверхности гидрата и большого числа контактов срастания. [40; 32; 51; 113]

С повышением основности тонкие лепестки, напоминающие фольгу, начинают скручиваться, образуя волокна с внутренней полостью, в которой могут размещаться молекулы воды. такая вода относится к адсорбционной; вода, которая

входит в состав кристаллогидратов и размещается между слоями кристаллической решётки, называется химически связанной. [29]

Гидросиликаты группы C-S-H(II) имеют более высокие отношения  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  и называются высокоосновными. Такие гидросиликаты кристаллизуются в виде отдельных волокон и пучков, характеризуются более низкими прочностными показателями. [17; 18; 23; 109]

Согласно [55; 65; 93], первичный кристаллический каркас цементного камня состоит из игольчатых кристаллов этtringита и волокнистых гидросиликатов кальция состава C-S-H (II) с отношением  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 1.5$ , который затем обрастает и упрочняется мелкодисперсными кристаллогидратами окиси кальция, гидроалюминатами и гидросиликатами кальция. Высокоосновные гидросиликаты C-S-H(II) характеризуются пониженной прочностью и стойкостью к сульфатной коррозии, при  $\text{pH} < 11$  они склонны к перекристаллизации.

Гидросиликаты кальция включают в себя как соединения с четко выраженной кристаллической структурой, так и плохо закристаллизованные вещества, состав части которых до настоящего времени недостаточно точно установлен [81]. Все гидросиликаты почти нерастворимы в воде.

В состав цементного камня входят гидросиликаты кальция – основные носители его прочности и долговечности.

При разработке высокоэффективного бетона с целью улучшения его физико-механических показателей целесообразно использовать современные высокоэффективные добавки.

Применение комплексных химических добавок обусловлено стремлением максимально использовать свойства индивидуальных добавок, главным образом добавок пластификаторов и ускорителей твердения. Правильно сочетая типы и количественные соотношения добавок можно направленно регулировать формирование структуры и, соответственно, физико-механические свойства цементного камня и бетона. Составы комплексных добавок (КД) назначают таким образом, чтобы их компоненты усиливали эффекты, обеспечиваемые каждой составляющей комплексной добавки в отдельности. При этом, периодически



возникает проблема совместимости их компонентов. В некоторых случаях отдельные компоненты вводят отдельно в несколько стадий. Комплексные добавки в виде готового товарного продукта, не изменяющего своих свойств при транспортировании и хранении, позволяют решить эту проблему.

Физические и химические аспекты взаимодействия органических и неорганических добавок между собой, а также с минеральными компонентами бетонов рассматриваются во многих современных работах [43; 90; 94; 102; 103 и т.д.].

Гидросиликат кальция (C-S-H) является основной фазой обычного портландцемента. [105]

В последнее десятилетие с целью улучшения удобоукладываемости бетонной смеси в качестве поверхностно активных веществ используют поликарбоксилатные полимеры.

Поликарбоксилаты чаще адсорбируются на алюминатной фазе клинкера и на поверхности двуводного гипса  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Кроме того, предполагается, что длинные молекулярные цепи – структуры полиэфиров обуславливают роль чисто стерического (пространственного) эффекта отталкивания между частицами цемента, увеличивая тем самым подвижность цементосодержащих систем. Комбинирование составов и режимов синтеза новых разновидностей суперпластификаторов позволяет регулировать и эффекты влияния на водосодержание и реологию бетонных смесей.

Классификация добавок в зависимости от основного эффекта действия осуществляется в соответствии с ГОСТ 24211. [33]. Эффективность действия добавок оценивается в соответствии с ГОСТ 30459 [34].

Модифицирование компонентов бетонной смеси является достаточно эффективным при использовании наномодификаторов. В качестве наномодификаторов применяют следующие добавки: углеродные астралены (C), углеродные фуллерены (C), углеродные нанотрубки (C), серебро (Ag), медь (Cu), диоксид титана ( $\text{TiO}_2$ ), диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) из отходов, диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ )

синтезированный, оксид железа III ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), оксиды других металлов, известь ( $\text{CaCO}_3$ ), полимерные наночастицы, наноплёнки, нановолокна [28; 39].

Нанорозмерные частицы могут являться перспективными модификаторами структуры цементного камня и бетонов на его основе, так как в большинстве случаев являются центрами кристаллизации новой фазы, проявляя высокую химическую активность и обеспечивая снижение внутренних напряжений в системе, тем самым повышая прочность и долговечность материала.

В работах Ю.М. Баженова [5], А.Г. Комара [7], В.Г. Батракова [9], Г.И. Горчакова [31], В.С. Грызлова, Е.В. Мельниковой [38], П.Г. Комохова, В.П. Попова [54] и других авторов отмечено, что управлять структурой и физико-механическими свойствами искусственного камня можно, опираясь на современные физико-механические представления о процессах структурообразования, не исключая при этом физико-химические факторы воздействия на формирующуюся структуру и свойства затвердевшего материала.

Необходимо отметить, что для достижения требуемой удобоукладываемости бетонной смеси используется, как правило, повышенное количество воды, относительно воды, необходимой для химического связывания в гидратные новообразования, и это образует открытую пористость в бетонном камне, что понижает его прочность и повышает проницаемость.

По-видимому, для создания высокоэффективного бетона, обладающего повышенной прочностью, пониженной проницаемостью, повышенной долговечностью требуются химические добавки, которые характеризуются пластифицирующим, водоредуцирующим, повышающим морозостойкость, понижающим проницаемость эффектом действия. Использовать несколько добавок при производстве бетонной смеси сложно, поэтому целесообразно создать комплексную химическую добавку на основе компонентов определённой природы, обладающих хорошей совместимостью и обеспечивающих одновременное решение всех указанных вопросов.

Создание высокоэффективной комплексной химической добавки и высокопрочного бетона с улучшенными показателями долговечности при её использовании посвящена научная работа.

#### 1.4 Постановка работы

В работах кафедры «Инженерная химия и естествознание» ФГБОУ ВО ПГУПС Императора Александра I (д.т.н. Сватовской Л.Б., д.т.н. Соловьёвой В.Я., к.т.н. Степановой И.В., к.т.н. Соловьёва Д.В.) в 2017-2023 годах сформированы представления о повышенной реакционной активности дисперсий коллоидного (нано) размера гидрозолей. Показано, что нанодисперсии гидроксида кремния,  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , в составе бетонной смеси обеспечивают образование сложных комплексных гидратных соединений, обладающих пониженной растворимостью, повышенной прочностью и твёрдостью и кристаллизующихся в виде удлинённых прочных волокон, оказывающих микроармирующее действие на формирующуюся структуру твердеющего искусственного камня, обеспечивая повышенный рост прочности на растяжение при изгибе в более позднем проектном возрасте, придавая создаваемому сооружению достаточную эксплуатационную надёжность.

При высотном домостроении, которое в последнее время приобретает масштабное развитие, особенно, в крупных городах России, необходимо принимать во внимание тот фактор, что чем выше здание, тем больше нагрузка на несущие конструкции и фундамент и для уменьшения массы здания целесообразно уменьшать толщину конструкций, без увеличения её металлоёмкости. Для этого необходимо создать бетон, обладающий повышенной прочностью на растяжение при изгибе не только в проектном возрасте, но и в начальный период времени, в начальный период формирования структуры, чтобы устойчиво выдержать все нагрузки, при монолитном строительстве.

Повышение трещиностойкости бетона в раннем возрасте, по-видимому, может быть достигнуто при модифицировании бетона веществами органической природы, обладающими разветвлённой структурой. В качестве таких соединений

могут быть использованы поликарбоксилатные полимеры [8, 9, 10] и в сочетании с полимерами другой природы, например, высокомолекулярными соединениями.

Если высказанные предположения справедливы, то создание высокоэффективного бетона, обладающего повышенной прочностью на растяжение при изгибе при высоких показателях прочности на сжатие, пониженной проницаемости и высоких показателях химической стойкости, морозостойкости и водонепроницаемости возможно при разработке новой комплексной добавки, содержащей компоненты определённой природы, обладающие хорошей совместимостью друг с другом и усиливающие эффективность каждого компонента.

Разработке инновационной комплексной химической добавки и созданию высокоэффективного бетона при её использовании посвящена данная научная работа.

### 1.5 Методы исследований и испытаний

Определение качественных показателей и физико-механических характеристик сырьевых материалов, используемых в исследованиях модифицируемых бетонов и композиционных вяжущих, проведено на поверенном оборудовании в соответствии со стандартами, приведёнными в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Стандартные методы испытаний, использованные в работе

Показатель	ГОСТ
<u>Цемент</u>	
Нормальная плотность	310.3-76
Сроки схватывания	310.3-76 ;, 30744-2001 п. 6
Равномерность изменения объёма	310.3-76; 30744-2001 п. 7
Прочность на сжатие	310.4-76; 30744-2001 п. 8.2.4
Прочность при изгибе	310.4-76; 30744-2001 п. 8.2.3
<u>Песок</u>	

Зерновой состав	8735-88 п. 3
Модуль крупности	8735-88 п. 3
Содержание пылевидных и глинистых частиц	8735-88 п. 5
Содержание глины в комках	8735-88 п. 4
Насыпная плотность	8735-88 п. 9
Влажность	8735-88 п. 10
<u>Щебень</u>	
Зерновой состав	8269.0-97 п. 4.3
Содержание зёрен пластинчатой (лещадной) и игловатой форм	8269.0-97 п. 4.7
Содержание пылевидных и глинистых частиц	8269.0-97 п. 4.5
Содержание глины в комках	8269.0-97 п. 4.6
Марка по дробимости	8269.0-97 п. 4.8
Морозостойкость	8269.0-97 п. 4.12
Влажность	8269.0-97 п. 4.19
<u>Смеси бетонные</u>	
Подвижность (марка по осадке конуса)	10181-2014 п. 4.2; 7473-2010
Средняя плотность	10181-2014 п. 5
Расслаиваемость (раствороотделение, водоотделение)	10181-2014 пп. 7.3, 7.4
<u>Бетон</u>	
Прочность на сжатие (кубиковая)	10180-2012
Прочность на растяжение при изгибе	10180-2012
Прочность на осевое растяжение	10180-2012
Прочность на сжатие (призменная)	24452-80
Модуль упругости	24452-80
Водопоглощение	12730.3-78
Водонепроницаемость	12730.5-84
Морозостойкость	10060-2012
Химическая стойкость	25246-82
Усадка	24544-81

Проведение экспериментов осуществлялось на образцах размером 4x4x16 см, 10x10x10 см и 10x10x40 см. Расчёт рецептур модифицированных бетонных смесей производился по ГОСТ 27006-86 «Бетоны. Правила подбора состава».

Прочностные показатели модифицированного и контрольного бетона определялись в соответствии с ГОСТ 10180-2012. Прочность на сжатие (кубиковая прочность) и прочность на растяжение при изгибе определялись на прессе ТП-1-1500. Прочность на осевое растяжение определялась на испытательной машине Powertest U-600, при этом деформации образцов измерялись при помощи экстензометра.

Призменная прочность, модуль упругости определены в соответствии с ГОСТ 24452-80 на испытательной машине Powertest U-600.

Коэффициент трещиностойкости бетона определялся по соотношению прочности на растяжение при изгибе к прочности на сжатие  $K_{тр} = R_{изг}/R_{сж}$

Для определения водонепроницаемости бетона изготавливали образцы цилиндры диаметром 150 мм и высотой 150 мм. Испытания проводили на установке УВФ-6/09.

Для оценки морозостойкости бетона изготавливались образцы-кубы с длиной ребра 100 мм. Замораживание образцов производили в климатической камере СН600С.

Удобоукладываемость бетонных смесей определялась в соответствии с ГОСТ 10181-2014 по осадке конуса.

Из физико-химических методов исследования использовались:

- рентгенофазовый;
- дифференциально-термический;
- ИК-спектроскопический;
- рН метрия.

ИК-спектроскопические исследования проводились на инфракрасном спектрометре Shimadzu в области длин волн 400-1400 см<sup>-1</sup> и 1200-4200 см<sup>-1</sup>. Навеска исследуемого вещества массой 5 и 7 граммов измельчалась в порошок и

смешивалась с КВ2 и прессовалась в виде таблеток с вакуумированием под давлением 50 кН.

Измерение водородного показателя рН проводилось с помощью цифрового рН-метра типа Показатели регистрировались через 6 минут.

Определение фазового состава кристаллических образований, основанное на дифракции рентгеновских лучей, выполнено рентгенофазовым анализом (РФА). Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре «Rigaku». Идентификация фаз проводилась с использованием дифрактометрических данных, представленных в базе порошковых данных PDF. Содержание кристаллических новообразований определялось методом внутреннего стандарта, представляющим собой некоторое количество стандартного вещества и сравнение его эффективности с эффективностью линий исследуемого компонента.

Дополнительно, для подтверждения данных РФА, проводилось определение фазового состава методом дифференциально-термического анализа (ДТА) на приборе Derivatograph-3500. Исследования проводились в инертных тиглях. Атмосфера печи прибора – воздушная, давление – атмосферное. Исследование проводилось в интервале температур от 20 °С до 1000 °С со скоростью изменения температуры 10 °С в минуту. Зависимость тепловых эффектов от температуры определялась по кривой ДТА, изменение массы от температуры – по кривой ТГ, скорость изменения массы от температуры – по кривой ДТГ.

## 1.6 Статистическая обработка данных

Прочность бетона на сжатие по контрольным образцам определялась испытаниями 30 последовательных серий образцов кубов 10x10x10 см по 3 образца в серии.

Прочность бетона на сжатие, вычислялась с точностью 0,1 МПа по формуле:

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

где  $F$  – разрушающая нагрузка, Н;

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

$\alpha = 0,95$  – масштабный коэффициент для приведения прочности бетона к прочности бетона в образцах базового размера.

Среднеквадратическое отклонение прочности бетона в партии  $S_m$  МПа, рассчитывают по формуле:

$$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - R_m)^2}{n - 1}}, \quad (1.2)$$

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

$R_i$  – 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:

$$V_m = \frac{S_m}{R_m} \cdot 100, \quad (1.3)$$

Среднее значение коэффициента вариации прочности бетона  $\bar{V}$ , % вычисляется по формуле:

$$\bar{V}_m = \frac{\sum_{i=1}^n V_{m_i} \cdot n_i}{\sum_{i=1}^n n_i}, \quad (1.4)$$

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

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

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

Результаты статистической обработки прочности бетона опытно-промышленного изготовления приведены в приложении А.



## **ГЛАВА 2. СОЗДАНИЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО БЕТОНА**

Бетоны повышенной эксплуатационной надёжности (высокой механической прочности, повышенной устойчивости к трещинообразованию, химической стойкости, сопротивляемости атмосферным воздействиям, отличающиеся повышенной морозостойкостью и водонепроницаемостью) в целом, обладающие повышенной долговечностью востребованы современным отечественным и зарубежным строительством для широкой номенклатуры изделий и конструкций.

Бетон и изделия на его основе используются для высотного домостроения, автомагистралей федерального назначения, для конструкций воздушных линий электропередач, для объектов специального назначения, например, для плавучих платформ добычи нефти и газа на морском шельфе, для атомных электростанций и других объектов промышленного и гражданского назначения.

Поэтому целесообразно исследовать и улучшать физико-механические показатели бетона, который является многофункциональным материалом, свойствами которого можно целенаправленно управлять, например при помощи химической активации бетонной системы, используя для этого высокоэффективные комплексные химические добавки.

### **2.1 Определение природы компонентов для создания комплексной химической добавки и оценка эффективности их действия относительно бетонной смеси и бетона**

Для проведения исследований использовали бетон В30, как наиболее востребованный в строительстве.

В качестве основных сырьевых материалов использовали следующие:

– цемент ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия» производства ОАО «Сланцевский цементный завод «ЦЕСЛА»;

- песок для строительных работ с модулем крупности  $M_k=2,2$  по ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия»;
- щебень гранитный фракции 5-10 мм по ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия»;
- вода по ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия».

Для приготовления бетонной смеси с маркой по удобоукладываемости ПЗ (осадка конуса 10-15 см) по ГОСТ 7476-2010 «Смеси бетонные. Технические условия» использован следующий расход материалов, кг/м<sup>3</sup>:

– портландцемент	– 370;
– песок	– 820;
– щебень	– 1040;
– В/Ц	– 052.

Для создания эффективной химической добавки рассматривали в качестве основы использование высокоэффективных поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые представлены поликарбоксилатными полимерами:

- на основе метакриловой кислоты;
- на основе акриловой кислоты и этилового эфира метакриловой кислоты;
- на основе ангидрида малеиновой кислоты.

Для исследования использовали водные растворы поликарбоксилатных полимеров с плотностью 1,019-1,021 г/см<sup>3</sup> и значением водородного показателя рН 6,5±0,5. Результаты проведенного исследования представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Оценка пластифицирующего эффекта действия поликарбоксилатных полимеров относительно бетонной смеси для бетона В30

№ п/п	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup> бетонной смеси	Поликарбоксилатные полимеры, % от массы цемента			Расход воды на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси	В/Ц	Подвижность бетонной смеси (ОК, см) (марка по подвижности П)
		на основе метакриловой кислоты	на основе акриловой кислоты и этилового эфира метакриловой кислоты	на основе ангидрида малеиновой кислоты			
1	370	-	-	-	192	0,519	13 (ПЗ)
2	370	0,6	-	-	163	0,440	13 (ПЗ)
3	370	0,8	-	-	161	0,435	14 (ПЗ)
4	370	1,0	-	-	160	0,432	14 (ПЗ)
5	370	-	0,6	-	161	0,435	14 (ПЗ)
6	370	-	0,8	-	159	0,430	14 (ПЗ)
7	370	-	1,0	-	158	0,427	14 (ПЗ)
8	370	-	-	0,6	157	0,424	14 (ПЗ)
9	370	-	-	0,8	155	0,419	15 (ПЗ)
10	370	-	-	1,0	154	0,416	15 (ПЗ)

Экспериментально установлено, что наибольшее пластифицирующее действие оказывает поликарбоксилат на основе ангидрида малеиновой кислоты, при использовании которого в рациональном количестве, равном 0,8 % от массы цемента, для достижения одинаковой подвижности, соответствующей марке ПЗ (ОК=10-15 см), расход воды уменьшается на 19 % относительно 16 и 17 % с другими поликарбоксилатными полимерами. Данные исследования явились основанием для использования поликарбоксилатного полимера на основе ангидрида малеиновой кислоты в качестве основы создаваемой добавки.

Необходимо отметить, что поликарбоксилатные полимеры обладают не только пластифицирующим эффектом, но и молекулы поликарбоксилата обладают способностью формировать полимерные цепочки различной длины и формы, что оказывает влияние на микроармирование формирующейся структуры бетона и, как следствие, повышение его трещиностойкости.

Для формирования новых свойств бетона, например, улучшения показателей на растяжение при изгибе, повышения коррозионной устойчивости требуется не только уплотнение структуры бетона за счёт пластифицирующего эффекта, но и

дополнительное уплотнение структуры за счёт образования повышенного количества новых гидратных фаз, обладающих определённой структурой, прочностью, твёрдостью, которые должны не только уплотнять структуру бетона и формировать новые контакты между компонентами бетонной смеси, придавая бетону особые свойства, например повышенную устойчивость к трещинообразованию.

С этой целью целесообразно исследовать в качестве реакционно-активного компонента дисперсии  $\text{SiO}_2$ .

Для оценки влияния размера дисперсий  $\text{SiO}_2$ , на его реакционную активность использовали дисперсии  $\text{SiO}_2$  наноразмера  $10^{-9}$  -  $10^{-7}$  м в виде водного раствора золя  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  с плотностью  $1,021 \text{ г/см}^3$  и значением водородного показателя  $\text{pH}=3,5$  и микродисперсии размером  $10^{-6}$  -  $10^{-5}$  м - микрокремнезём марки МК-85, представленный в виде тонкодисперсного порошка.

Сравнительная оценка влияния размера дисперсий  $\text{SiO}_2$  производилась по изменению водопотребности бетонной смеси и изменению прочности бетона в проектном возрасте. Результаты исследований представлены в таблице 2.2.

Установлено, что при использовании микродисперсий  $\text{SiO}_2$  в виде микрокремнезёма в присутствии поликарбоксилатного полимера водопотребность бетонной смеси уменьшается на 14 %. Сочетание поликарбоксилата с нанодисперсиями диоксида кремния  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  является более эффективным, так как водопотребность бетонной смеси понижается более чем на 20 % и при этом наблюдается повышенный рост прочности на растяжение при изгибе в проектном возрасте, который на 56 % превосходит прочность контрольного состава. При использовании рационального количества микрокремнезёма МК-85 прочность на растяжение при изгибе повышается не более чем на 23 %. В присутствии нанодисперсий  $\text{SiO}_2$  в большей степени уменьшается водопоглощение затвердевшего бетона, которое составляет  $W_M=3,1 \%$ .

Таблица 2.2 – Сравнительная оценка эффективности действия микро- и нанодисперсий SiO<sub>2</sub> в сочетании с поликарбоксилатным полимером на основе ангидрида малеиновой кислоты

№ п/п	Проектный класс бетона В (требуемая прочность, МПа)	Проектный класс бетона В <sub>н</sub> (требуемая прочность, МПа)	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup> бетонной смеси	Компоненты добавки, % от массы цемента			В/Ц	Прочность, МПа / %		Водопоглощение W <sub>м</sub> , %
				Водный раствор поликарбоксилата	Микродисперсии SiO <sub>2</sub>	Нанодисперсии SiO <sub>2</sub>		на сжатие	на растяжение при изгибе	
1	В30 (38,4)	В <sub>н</sub> 3,6 (4,6)	370	-	-	-	0,52	39,0/100	4,6/100	4,1
2			370	0,6	-	-	0,424	41,7/107	4,9/107	4,0
3			370	0,8	-	-	0,419	43,3/111	5,2/113	3,9
4			370	1,0	-	-	0,416	44,1/113	5,2/113	3,8
5			370	0,8	8,0	-	0,440	47,2/121	5,8/127	3,3
6			370	0,8	10,0	-	0,450	48,0/123	5,9/129	3,3
7			370	0,8	12,0	-	0,460	48,0/123	5,9/129	3,3
8			370	0,8	-	0,5	0,415	55,8/143	7,1/154	3,1
9			370	0,8	-	0,6	0,441	57,3/147	7,2/156	3,1
10			370	0,8	-	0,7	0,441	56,5/145	7,2/156	3,1

Результаты научно-экспериментальных исследований подтверждают, что нанодисперсии SiO<sub>2</sub> в большей степени, чем микродисперсии, увеличивают пластифицирующий эффект поликарбоксилатного полимера и при этом оказывают повышенное реакционно-активное действие на компоненты бетона. Положительные результаты явились основанием для рассмотрения нанодисперсий диоксида кремния в качестве активного компонента создаваемой добавки, который анализировали при проведении научных исследований.

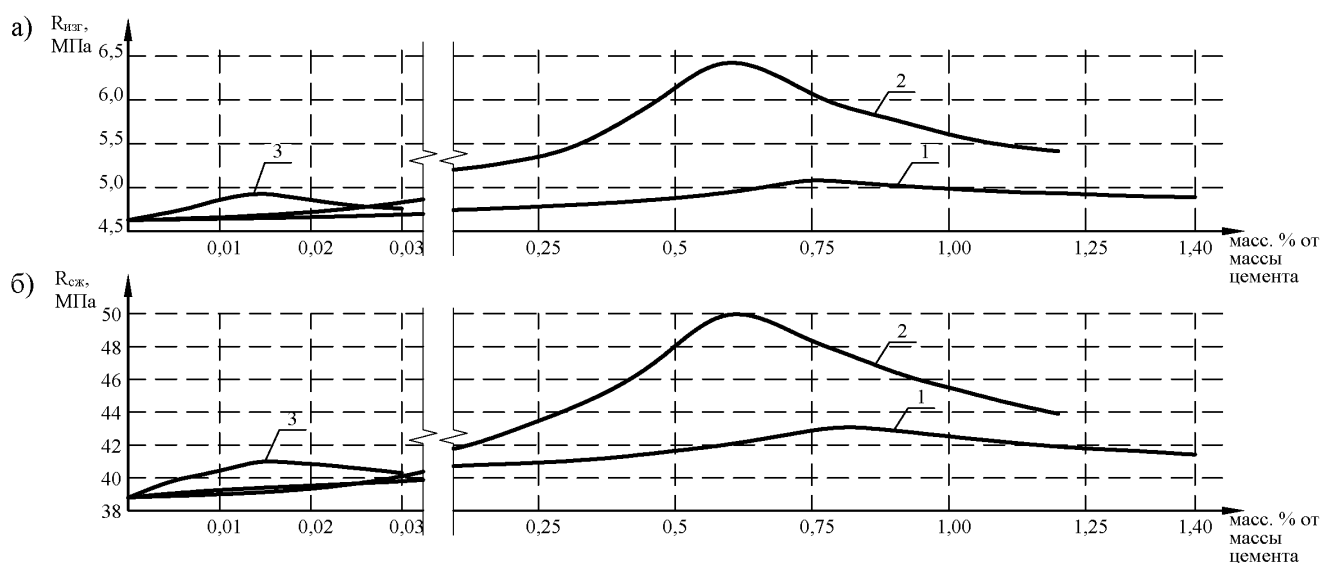
С целью возможного повышения прочности на растяжение при изгибе в раннем возрасте, а также в процессе всего периода твердения бетона, в качестве дополнительного компонента добавки рассматривали использование полимера на основе калиевых солей высших жирных кислот с  $\rho=1,03$  г/см<sup>3</sup> рН=7,5.

Для создания бетона, обладающего прочной, плотной структурой с равномерным распределением пор по всему объёму, целесообразно использовать пеногаситель с целью обеспечения равномерного вовлечения воздуха в бетонную

смесь в пределах (4-6) %. С этой целью использовали пеногаситель на основе силиконового масла с вязкостью  $67 \text{ мм}^2/\text{с}$ , представленный кремний-органическим соединением  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$  и органическими радикалами  $-\text{CH}_3$  и  $-\text{C}_2\text{H}_5$ , с техническим названием Пеногаситель Ф-67 по ТУ 20.59.59-007-98593931-2018, обладающий положительным эффектом пеногашения.

Рациональное количество каждого компонента разрабатываемой комплексной химической добавки определяли по изменению показателей прочности на сжатие и на растяжение при изгибе бетона В30, полученные результаты представлены на рисунке 2.1.

Экспериментально установлено, что все исследуемые компоненты добавки в рациональном количестве повышают прочность бетона в проектном возрасте на сжатие на 5-28 % и на растяжение при изгибе на 9-41 %.



1 – полиакрилатный полимер на основе ангидрида малеиновой кислоты; 2 – нанодисперсии диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ ; 3 – полимер на основе калиевой соли высшей жирной кислоты.

а) изменение прочности на сжатие;

б) изменение прочности на растяжение при изгибе.

Рисунок 2.1 – Оценка эффективности основных компонентов добавки

Следующий этап исследования посвящён оценке совместимости полиакрилатата с исследуемыми компонентами для создания эффективной химической добавки и определения эффективности их совместного действия. Результаты научно-экспериментальных исследований представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Оценка эффективности совместного действия поликарбоксилата с компонентами разрабатываемой комплексной химической добавки

№ п/п	Проектный класс бетона В (требуемая прочность, МПа)	Проектный класс бетона В <sub>об</sub> (требуемая прочность, МПа)	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup> бетонной смеси	Компоненты добавки, % от массы цемента (рациональное количество)			В/Ц	Марка по удобукладываемости, П	Прочность, МПа / %			
				Поликарбоксилат на основе ангидрида малеиновой кислоты	Полимер на основе калиевых солей высших жирных кислот	Нанодисперсии SiO <sub>2</sub>			на сжатие		на растяжение при изгибе	
									Возраст, сут			
									7	28	7	28
1	В30 (38,4)	В <sub>об</sub> 3,6 (4,6)	370	-	-	-	0,52	ПЗ	<u>27,7</u> 100	<u>39,0</u> 100	<u>3,2</u> 100	<u>4,6</u> 100
2			370	0,8	-	-	0,43	ПЗ	<u>31,6</u> 114	<u>43,3</u> 111	<u>3,7</u> 115	<u>5,1</u> 111
3			370	-	0,015	-	0,45	ПЗ	<u>29,3</u> 106	<u>41,2</u> 105	<u>3,6</u> 113	<u>5,0</u> 109
5			370	-	-	0,6	0,44	ПЗ	<u>30,1</u> 109	<u>50,0</u> 128	<u>3,8</u> 118	<u>6,4</u> 141
5			370	0,8	0,015	-	0,42	ПЗ	<u>32,1</u> 116	<u>44,6</u> 114	<u>4,4</u> 137	<u>5,6</u> 121
6			370	0,8	-	0,6	0,42	ПЗ	<u>41,8</u> 123	<u>57,3</u> 147	<u>4,1</u> 128	<u>7,2</u> 156

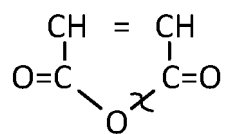
По данным экспериментальных исследований установлено (таблица 2.1) и подтверждено (таблица 2.3), что поликарбоксилат на основе ангидрида малеиновой кислоты обеспечивает уменьшение В/Ц отношения на 19 %. Добавление к поликарбоксилату полимера на основе калиевых солей высших жирных кислот или нанодисперсий диоксида кремния SiO<sub>2</sub> в рациональных количествах усиливает его пластифицирующий эффект, уменьшая В/Ц отношение до 20 %.

Нанодисперсии с поликарбоксилатным полимером оказывают положительное влияние на повышение прочности в проектном возрасте: на сжатие на 47 % и в большей степени на растяжение при изгибе на 56 %.

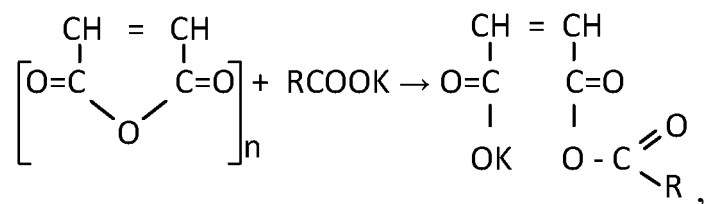
Использование поликарбоксилатного полимера в сочетании с калиевой солью высшей жирной кислоты оказывает положительное влияние на рост прочности бетона начиная с раннего возраста. В возрасте 7 суток повышение прочности на сжатие составляет 16 % и в большей степени происходит повышение прочности на растяжение при изгибе 37 %.

Для объяснения полученного результата проведены ИК-спектроскопические исследования смеси, состоящей из поликарбоксилатного полимера на основе ангидрида малеиновой кислоты и полимера на основе калиевой соли карбоновой кислоты в раннем возрасте, а также смеси полимеров при дополнительном использовании цемента.

Установлено, что ангидрид малеиновой кислоты, обладает повышенной реакционной активностью, и способен участвовать в реакциях, сопровождающихся разрывом кислородного мостика



В присутствии калиевой соли карбоновой кислоты вида: R-COOK (где R – C<sub>17</sub>H<sub>35</sub>) в цементсодержащей системе происходит следующее химическое взаимодействие:



которое приводит к образованию нового соединения, отличающегося образованием разветвлённой поликарбоксилатной цепи, формируя новый структурный каркас на молекулярном уровне, упрочняя и армируя цементный камень. Высказанные ранее теоретические предположения подтверждены данными ИК-спектроскопических исследований (рисунок 2.3), которые проведены при помощи ИК-Фурье спектрометра IRTraser-100 Shimadzu (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – ИК-Фурье спектрометр IRTraser-100 Shimadzu



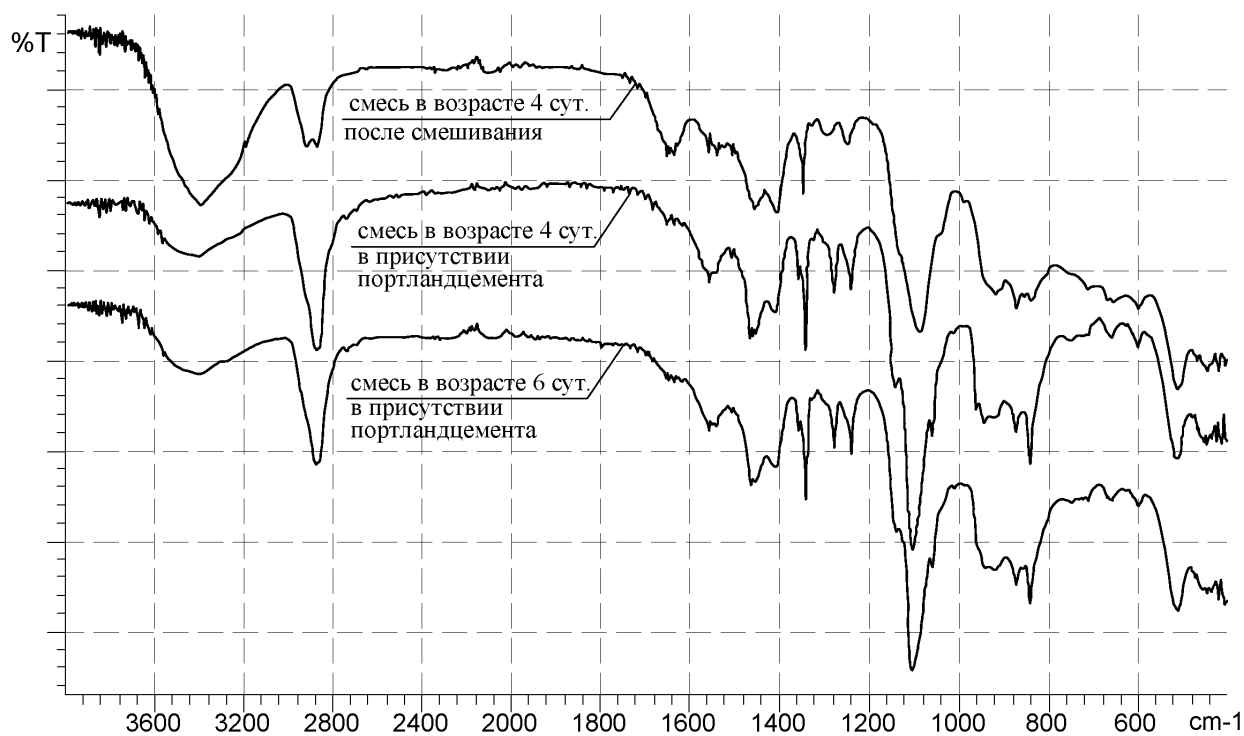


Рисунок 2.3 – Спектрограммы смеси: поликарбоксилатный полимер + полимер на основе калиевой соли карбоновой кислоты

Анализ спектров в смеси полимеров показал, что в присутствии портландцемента увеличились полосы поглощения в области 349-1241  $\text{cm}^{-1}$ . Новые полосы поглощения, по-видимому, обусловлены появлением новых связей С-О (1349  $\text{cm}^{-1}$  деформационные колебания) и С-О-С (1241  $\text{cm}^{-1}$  валентные колебания), которые подтверждают образование новой разветвлённой поликарбоксилатной цепи, оказывающей положительное влияние на повышение трещиностойкости бетона, начиная с раннего возраста.

Нанодисперсии диоксида кремния  $\text{SiO}_2$  получены методом ионного обмена путём пропускания водного раствора жидкого стекла  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , через катионитовую колонку с катионитом КУ-2-8, насыщенным катионами водорода  $\text{H}^+$ , в результате образуется  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  размером 50-70 нм, который определён при помощи лазерного дифракционного анализатора размера частиц SALD-2300 Shimadzu (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Лазерный дифракционный анализатор частиц SALD-2300 Shimadzu

Для создания бетона, отличающегося повышенной долговечностью, целесообразно обеспечить формирование плотной мелкопоровой структуры с равномерным распределением пор по всему объёму, что достигается, как указывалось выше, использованием специальных добавок, обеспечивающих равномерное вовлечение воздуха при приготовлении бетонной смеси. С этой целью в бетонную смесь вводили Пеногаситель Ф-67.

Проведённые научно-экспериментальные исследования и полученные наилучшие результаты позволили определить рациональный состав новой комплексной химической добавки, мас. %:

- водный раствор поликарбоксилата на основе ангидрида малеиновой кислоты с  $\rho$  1,023 г/см<sup>3</sup> и pH 6,5 – 56,14;
- полимер на основе калиевой соли высшей жирной кислоты с  $\rho$  1,03 г/см<sup>3</sup> и pH 7,5 – 1,05;
- нанодисперсии диоксида кремния размером 50-70 нм в виде водного раствора золя SiO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O с  $\rho$  1,021 г/см<sup>3</sup> и pH 3,5 – 42,11;
- Пеногаситель Ф67 на основе силиконового масла, представленного кремнийорганическим соединением –Si–O–Si–O– и органическими радикалами CH<sub>3</sub> и C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, с вязкостью 67 мм<sup>2</sup>/с. – 0,70.

Полученная комплексная химическая добавка представляет собой водный однородный раствор светло-коричневого цвета с плотностью  $\rho$  1,038 г/см<sup>3</sup> и значением водородного показателя pH 6,5, содержание сухих веществ 13,4 %.

Результаты по оценке эффективности действия разработанной комплексной химической добавки и определение её рационального количества представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Оценка эффективности действия разработанной комплексной химической добавки

№ П/П	Проектный класс бетона В	Проектный класс бетона В <sub>тб</sub>	Расход цемента (кг/м <sup>3</sup> )/%	Комплексная добавка, % от массы цемента (кг)	В/Ц	Марка по удобоукладываемости	Прочность на сжатие R, МПа/%	Фактический класс бетона В	Прочность на растяжение при изгибе R <sub>тб</sub> , МПа/%	Фактический класс бетона В <sub>тб</sub>	Коэффициент трещиностойкости, K <sub>тр</sub> = R <sub>тб</sub> / R	Водопоглощение W <sub>м</sub> , %
1	В30	В <sub>тб</sub> 3,6	370/100	-	0,5	ПЗ	39,3/100	В31	4,6/100	В <sub>тб</sub> 3,6	0,115	4,1
2			370/100	0,8 (2,96)	0,4	ПЗ	60,9/155	В48	7,9/172	В <sub>тб</sub> 6,3	0,130	2,9
3			370/100	1,0 (3,70)	0,3	ПЗ	63,3/161	В50	8,6/187	В <sub>тб</sub> 6,8	0,136	2,7
4			370/100	1,2 (4,44)	0,3	ПЗ	62,2/158	В49	7,9/172	В <sub>тб</sub> 6,3	0,127	2,9

Установлено, что разработанная комплексная химическая добавка обладает уникальным сочетанием компонентов, совместное присутствие которых уменьшает В/Ц отношение на 25 %; уменьшается водопоглощение на 34 % до значения W<sub>м</sub>=2,7 %; повышается прочность на сжатие на 61 % и в большей степени прочность на растяжение при изгибе - на 87%.

Рост прочности на сжатие обусловлен уплотнением структуры бетона в результате уменьшения В/Ц отношения и повышения степени гидратации компонентов бетонной смеси в присутствии комплексной химической добавки. Увеличение прочности на растяжение при изгибе, по-видимому, обусловлено микроармированием формирующейся структуры бетона при помощи образования новых разветвлённых полимерных цепочек и образования новых комплексных гидратных фаз, например, с повышенным содержанием SiO<sub>2</sub> (низкоосновных гидросиликатов), кристаллизующихся в виде прочных удлинённых волокон.

## 2.2 Выводы по главе

1 Разработана высокоэффективная комплексная химическая добавка, состоящая из поликарбоксилатного полимера на основе ангидрида малеиновой кислоты, нанодисперсий гидроксида кремния  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , высокомолекулярного соединения на основе калиевых солей высших жирных кислот и пеногасителя Ф67 на основе силиконового масла, представленного  $\text{CH}_3$  и  $\text{C}_2\text{H}_5$ , с вязкостью  $67 \text{ мм}^2/\text{с}$  при следующем соотношении компонентов, мас. %:

- водный раствор поликарбоксилата на основе ангидрида малеиновой кислоты с  $\rho 1,023 \text{ г/см}^3$  и pH 6,5 – 56,14;
- полимер на основе калиевой соли высшей жирной кислоты с  $\rho 1,03 \text{ г/см}^3$  и pH 7,5 – 1,05;
- нанодисперсии диоксида кремния размером 50-70 нм в виде водного раствора золя  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  с  $\rho 1,021 \text{ г/см}^3$  и pH 3,5 – 42,11;
- Пеногаситель Ф67 на основе силиконового масла, представленного кремнийорганическим соединением  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$  и органическими радикалами  $\text{CH}_3$  и  $\text{C}_2\text{H}_5$ , с вязкостью  $67 \text{ мм}^2/\text{с}$ . – 0,70.

2 Установлено, что разработанная комплексная химическая добавка в соответствии с ГОСТ 24211-2008 обладает суперпластифицирующим эффектом действия, обеспечивая уменьшение расхода воды на 25 %. и является повышающей прочность.

3 Установлено, что использование комплексной химической добавки повышает в проектном возрасте прочность на сжатие на 61 % и на растяжение при изгибе на 87 %, увеличивая устойчивость бетона к трещинообразованию на 18 %.



$C_2S$  (двухкальциевый силикат) –  $16,0 \pm 1,5$ ;

$C_3A$  (трёхкальциевый алюминат) –  $4,8 \pm 0,1$ ;

$C_4AF$  (четырёхкальциевый алюмоферрит) –  $11,3 \pm 0,2$ .

Использовали:

1 Песок для строительных работ по ГОСТ 8736-2014 с  $M_k=2,2$ . Содержание пылевидных и глинистых частиц 0,76 %. Глины в комках нет. Насыпная плотность песка в состоянии естественной влажности  $1420 \text{ кг/м}^3$ .

2 Щебень фр. 5-10 мм по ГОСТ 8267-93. Содержание пылевидных и глинистых частиц 0,89 %. Глины в комках нет. Насыпная плотность щебня в состоянии естественной влажности  $1390 \text{ кг/м}^3$ . Содержание лещадных зёрен – 3,6 %.

3 разработанную комплексную химическую добавку, представленную водным раствором бежевого цвета с плотностью  $\rho 1,037 \text{ г/см}^3$ , концентрацией водородных ионов, определяемых по величине  $pH=7,5 \pm 0,5$ ;

4 воду по ГОСТ 23732-2011.

В соответствии с ГОСТ 10180-2012 для определения прочности на сжатие изготавливали образцы-кубы размером  $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$  в количестве 6 шт. для каждого определения прочности. Для каждого определения прочности на растяжение при изгибе изготавливали образцы-призмы размером  $10 \times 10 \times 40 \text{ см}$  в количестве 4 шт.

Коэффициент трещиностойкости определяли расчётно-экспериментальным путём по следующей формуле:  $K_{TR} = R_{tb}/R$ .

На I этапе исследования определяли изменение прочности бетона в возрасте 7 и 28 суток при твердении в нормальных условиях ( $t=20 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$  и  $W \geq 95 \%$ ). Прочность бетона на сжатие определяли на испытательном прессе ТП-Т-1500 (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Испытания образцов бетона сжатие на испытательном прессе ТП-Т1500

Контрольный состав бетона имел следующий расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси, кг:

- ПЦ – 370;
- Песок с  $M_k=2,2$  – 860;
- Щебень фр. 5-10 мм – 970;
- Вода – 192.

Сравнительные результаты по изменению показателей прочности на сжатие в течение анализируемого периода, равного 28 суток представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Сравнительные результаты по кинетике изменения прочности на сжатие бетона контрольного состава и с разработанной комплексной нанополимерной добавкой

№ П/П	Проектный класс бетона, В	Требуемая прочность, МПа	Расход цемента (кг/м <sup>3</sup> )/%	Комплексная добавка, % от массы цемента (кг)	Вода, л	В/Ц	Марка по удобоукладываемости (ОК, см)	Прочность на сжатие R, МПа/%		Фактический класс бетона, В
								Возраст, сут		
								7	28	
1	В30	38,4	370/100	-	192	0,52	ПЗ (11,8)	26,1/100	39,3/100	31
2			370/100	1,0 (3,70)	144	0,39	ПЗ (12,0)	36,3/139	63,3/162	50
3			333/90	1,0 (3,30)	133	0,40	ПЗ (12,1)	31,6/121	49,9/127	40
4			315/85	1,0 (3,15)	135	0,42	ПЗ (11,9)	29,2/112	45,2/115	35
5			296/80	1,0 (3,00)	130	0,43	ПЗ (11,7)	27,6/106	42,8/109	33
6			278/75	1,0 (2,80)	125	0,44	ПЗ (11,6)	25,6/98	39,7/101	32

Экспериментально установлено, что:

- разработанная комплексная химическая добавка обладает повышенным пластифицирующим эффектом, так как при её использовании для обеспечения одинаковой подвижности бетонной смеси, соответствующей марке по подвижности ПЗ, используется пониженный на 25 % расход воды относительно контрольного состава и в соответствии с ГОСТ 24211-2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия» такого типа добавки относятся к суперпластифицирующим добавкам;
- использование комплексной химической добавки обеспечивает повышение прочности на сжатие в проектном возрасте на 62 %, при этом фактический класс бетона повышается от значения В30 до значения В50;
- экспериментально установлено, что разработанная комплексная химическая добавка позволяет уменьшить расход цемента на 20-25 % без ухудшения показателей подвижности и прочности в проектном возрасте.



Дальнейшие исследования заключались в определении прочности на растяжение при изгибе и, как следствие, определении коэффициента трещиностойкости бетона расчётным путём. Результаты исследований представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Сравнительные результаты по кинетике изменения прочности на растяжение при изгибе бетона контрольного состава и с разработанной комплексной нанополимерной добавкой

№ П/П	Проектный класс бетона, В	Проектный класс бетона, $V_{tb}$	Расход цемента ( $\text{кг}/\text{м}^3$ )/%	Комплексная добавка, % от массы цемента (кг)	В/Ц	Марка по удобоукладываемости	Прочность на сжатие R, МПа/%	Прочность на растяжение при изгибе $R_{tb}$ , МПа/%	Фактический класс бетона, $V_{tb}$	Коэффициент трещиностойкости, $K_{тр} = R_{tb}/R$
							Возраст, сут			
							28			
1	V30	$V_{tb}3,6$	370/100	-	0,52	ПЗ	39,1/100	4,6/100	3,6	0,117
2	V30	$V_{tb}3,6$	370/100	1,0 (3,70)	0,41	ПЗ	63,3/162	8,6/187	6,9	0,136
3	V30	$V_{tb}3,6$	296/80	1,0 (3,00)	0,43	ПЗ	42,8/109	5,9/128	4,7	0,138
4	V30	$V_{tb}3,6$	278/75	1,0 (2,78)	0,44	ПЗ	39,7/101	5,4/117	4,4	0,135

Анализ данных, представленных в таблице 3.2 показывает, что при одинаковом расходе цемента на  $1 \text{ м}^3$  бетонной смеси рост прочности на растяжение при изгибе у модифицированного бетона составляет 87 % и более чем на 24 % превосходит рост прочности на сжатие, что придаёт бетону повышенную устойчивость к трещинообразованию и в соответствии с представленными данными рассчитанное значение коэффициента трещиностойкости модифицированного бетона ( $K_{тр}=0,136$ ) более чем на 16 % превосходит коэффициент трещиностойкости контрольного состава ( $K_{тр}=0,117$ ).

При уменьшении расхода цемента в пределах 20 % модифицированный бетон характеризуется одинаково высоким значением коэффициента трещиностойкости  $K_{тр}=0,138$ , при дальнейшем уменьшении расхода цемента в пределах 25 %,

показатели прочности на сжатие и на растяжение при изгибе имеют достаточно высокие значения и обеспечивают достижение бетоном проектных показателей прочности, но при этом коэффициент трещиностойкости уменьшается до значения  $K_{тр}=0,135$ , по-видимому, в твердеющей системе с уменьшением расхода цемента уменьшается образование новых гидратных фаз, обладающих особой, например игольчатой или волокнистой структурой. Возможно, в твердеющей системе уменьшается количество образующихся контактов между вновь образованными гидратными фазами и поверхностью твёрдых компонентов, в том числе и гибких s-p контактов.

Для дополнительного подтверждения повышенной устойчивости бетона к трещинообразованию провели исследования по изменению его прочности на осевое растяжение и определению модуля упругости.

Испытания на осевое растяжение проводили по п. 7.5 ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Для проведения испытаний изготавливали образцы-балочки размером 100x100x400 мм в количестве 6 штук для каждого определения прочности на осевое растяжение.

Прочность на осевое растяжение  $R_t$ , МПа, вычисляется по формуле:

$$R_t = \beta \frac{F}{A'} \quad (3.1)$$

где  $F$  – разрушающая нагрузка, Н;

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

$\beta$  - масштабный коэффициент 0,92.

Модуль упругости и призмную прочность определяли по ГОСТ 24452-80 «Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона». Для этого изготавливали образцы-призмы размером 100x100x400 мм.

Испытания на призмную прочность, модуль упругости и осевое растяжение проводили на испытательной машине Powertest U-600 (рисунок 3.2) в возрасте 28 суток нормального твердения.



Рисунок 3.2 – Испытания образцов бетона на испытательной машине Powertest U-600

При определении модуля упругости рассматривали деформации от кратковременного действия нагрузок. Бетон подвергался испытанию после 28-суток твердения образцов в нормальных условиях.

Деформацию бетона определяли постепенным нагружением призмы. Отсчёты снимали с интервалом, равными 10 % от разрушающей нагрузки  $R_p$ , до уровня нагрузки  $(40+5\%) R_p$ . Результаты испытаний представлены в таблице 3.3. Полученная зависимость деформаций от нагрузки представлена на рис. 3.3.

По данным испытаний рассчитывали модуль упругости бетона при нагружении в интервале от 0 до 30 % от  $R_p$  в соответствии с ГОСТ 24452-80, полученные результаты представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.3 – Зависимость относительных деформаций бетона от нагрузки

Состав бетона	Фактический класс бетона, В	Степень нагружения	Нагрузка, кН	Напряжения $\sigma$ , МПа	Относительная деформация $\varepsilon \cdot 10^5$	Модуль упругости бетона $E_b$ , МПа $\cdot 10^{-3}$
Контрольный состав бетона	31	0,1 $\cdot P_p$	28,1	2,81	8,203	34,4
		0,2 $\cdot P_p$	56,2	5,62	16,301	
		0,3 $\cdot P_p$	84,3	8,43	24,482	
		0,4 $\cdot P_p$	112,4	11,24	32,685	
Модифицированный бетон	50	0,1 $\cdot P_p$	45,5	4,55	10,821	42,2
		0,2 $\cdot P_p$	91,0	9,10	21,561	
		0,3 $\cdot P_p$	136,5	13,65	32,314	
		0,4 $\cdot P_p$	182,0	18,20	43,095	
Модифицированный бетон с уменьшенным на 20 % расходом цемента	34	0,1 $\cdot P_p$	33,8	3,38	8,907	38,0
		0,2 $\cdot P_p$	67,6	6,76	17,785	
		0,3 $\cdot P_p$	101,4	10,14	26,654	
		0,4 $\cdot P_p$	135,2	13,52	35,544	

Модуль упругости бетона В31 контрольного состава:

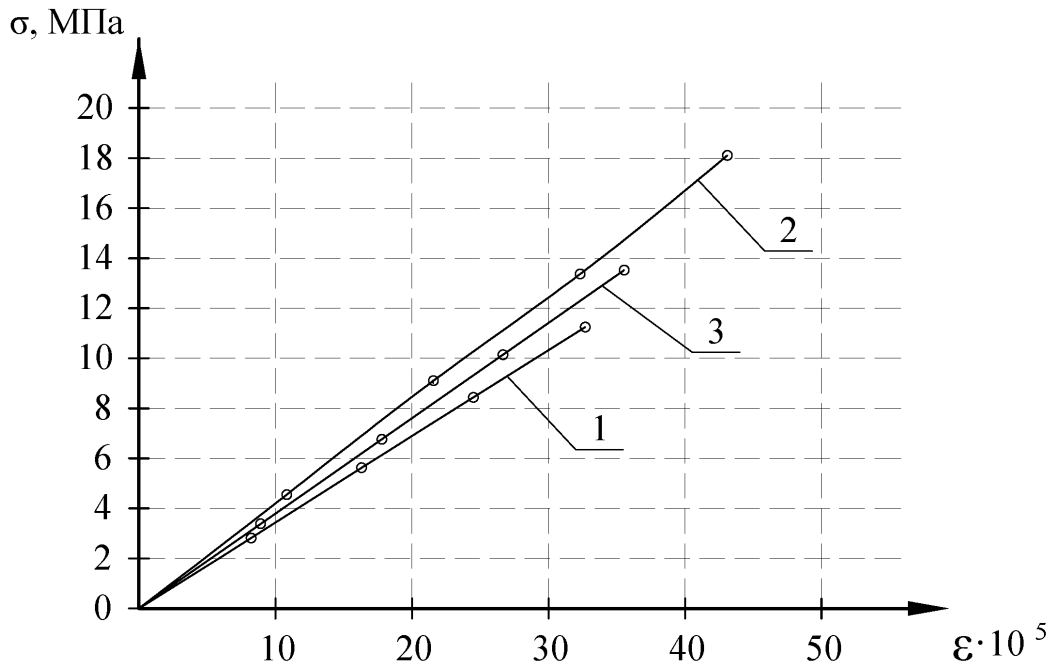
$$E_b^{B31} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{8,43 \text{ МПа}}{0,00024482} = 34,4 \text{ МПа.}$$

Модуль упругости модифицированного бетона В50:

$$E_b^{B50} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{13,65 \text{ МПа}}{0,00032314} = 42,2 \text{ МПа.}$$

Модуль упругости модифицированного бетона В34 с уменьшенным на 20 % расходом цемента:

$$E_b^{B34} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{10,14 \text{ МПа}}{0,00026654} = 38,0 \text{ МПа.}$$



- 1 – контрольный состав бетона, В31;  
 2 – модифицированный бетон, В50;  
 3 – модифицированный бетон с уменьшенным на 20 % расходом цемента, В34.

Рисунок 3.3 – Диаграмма зависимости относительных деформаций от напряжений в бетоне

По диаграмме зависимости относительных деформаций  $\epsilon$  от напряжений  $\sigma$  в бетоне видно, что относительные деформации бетона для всех трёх образцов изменяется практически линейно, соответственно, начальный модуль упругости бетона  $E_b$  меняется так же линейно в соответствии с законом Гука. При одинаковом уровне напряжений в бетоне относительные деформации в модифицированном бетоне меньше, чем в бетоне контрольного состава, это говорит о повышенной жёсткости модифицированного бетона, которая определяется модулем деформации  $E_b$ .

Результаты всех проведённых испытаний представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Сравнительные результаты по изменению прочности на осевое растяжение и деформативные характеристики бетона контрольного состава и с разработанной комплексной химической добавкой

№ П/П	Проектный класс бетона, В	Расход цемента (кг/м <sup>3</sup> )/%	Комплексная добавка, % от массы цемента (кг)	В/Ц	Марка по удобоукладываемости	Прочность на сжатие R, МПа	Фактический класс бетона, В	Прочность на осевое растяжение R <sub>t</sub> , МПа / %	Модуль упругости E <sub>b</sub> , МПа · 10 <sup>-3</sup>	Призменная прочность R <sub>пр</sub> , МПа / % от прочности на сжатие
1	30	370/100	-	0,52	ПЗ	39,1	31	2,22	34,4	28,1/72
2	30	370/100	1,0 (3,70)	0,39	ПЗ	63,3	50	3,36	42,2	51,2/81
3	30	296/80	1,0 (3,00)	0,44	ПЗ	48,8	34	2,70	38,0	38,6/79
4	30	278/75	1,0 (278)	0,45	ПЗ	44,7	32	2,25	34,6	34,1/77

Анализ данных, представленных в таблице 3.4 показывает, что модифицированный бетон обладает повышенной трещиностойкостью, что подтверждается:

– более высоким значением призменной прочности, которое на 82 % превышает значение призменной прочности контрольного состава, и более высоким значением относительно прочности на сжатие образцов данного состава;

– экспериментально определено, при одинаковом расходе цемента:

- призменная прочность контрольного состава составляет 72 % от прочности на сжатие;
- призменная прочность модифицированного бетона составляет 81 % от прочности на сжатие.

– прочность на осевое растяжение R<sub>t</sub> модифицированного бетона на 64 % выше прочности на осевое растяжение R<sub>t</sub> контрольного состава при одинаковом расходе цемента и выше на 32 % при уменьшенном расходе цемента на 20 %.

При дальнейшем уменьшении расхода цемента, прочность на осевое растяжение уменьшается в большей степени и превышает прочность контрольного

состава не более, чем на 9 %, поэтому для практического применения не целесообразно рассматривать составы с уменьшенным более чем на 20 % расходом цемента.

Для подтверждения повышенной устойчивости модифицированного бетона к трещинообразованию кроме проведенных исследований определяли модуль упругости бетона экспериментальным путём по ГОСТ 24452-80.

### **3.2 Сравнительная оценка долговечности бетона**

Долговечность бетона оценивали по изменению параметров водонепроницаемости, морозостойкости и коррозионной стойкости.

Долговечность бетона взаимосвязана с плотностью структуры, косвенной оценкой которой является величина водопоглощения по массе  $W_M$ , определяемой по ГОСТ 12730.5-2018. На формируемую структуру бетона, т.е. на её уплотнение, принципиальное влияние оказывают химические добавки пластифицирующего действия, а также количество и качество образующихся комплексных гидратных соединений, образующихся в процессе твердения бетона.

#### **3.2.1 Оценка морозостойкости бетона**

Морозостойкость бетона определяли по ГОСТ 10060-2012 по третьему ускоренному методу. Испытания проводили в климатической камере (рисунок 3.4), где процесс замораживания и оттаивания осуществлялся в автоматическом режиме. Водонасыщение осуществляли в 5% растворе NaCl, процесс замораживания образцов осуществляли при температуре  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  в растворе NaCl в течение 2,5 часов и процесс оттаивания осуществляли в этом же растворе NaCl при температуре  $20\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 4 часов. Для этого изготавливали образцы-кубы размером 100x100x100 мм в количестве 6 шт. контрольных образцов и 6 шт. основных для всех исследуемых составов бетона. Результаты проведённых испытаний образцов представлены в табл. 3.5.



Рисунок 3.4 – Климатическая камера



Таблица 3.5 – Оценка морозостойкости контрольного состава бетона и бетона, модифицированного комплексной химической добавкой

Состав бетона	Исходные данные				Результаты испытаний											
	Для контр-х образцов		Для основных		Контрольных, после насыщения 5 % р-ом NaCl						Основных					
	№ образца	Плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	№ образца	Плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	№ образца	Предел прочности Xi, МПа	Нижняя граница доверительного интервала X <sub>min</sub> с коэф. 0,9, МПа	№ образца	Масса образца после насыщения в 5 % р-е NaCl, г	Число конечных циклов (ускоренных)	Масса образца, г	Среднее уменьшение массы образца, %	Предел прочности Xi, МПа	Нижняя граница доверительного интервала X <sub>min</sub> , МПа		
Контрольный, В30	1	2369	7	2373	1	40,1	34,89	7	2403	200	2357	1,96	39,0	38,07		
	2	2359	8	2371	2	39,7		8	2398		2352		39,8			
	3	2377	9	2363	3	39,9		9	2390		2346		39,0			
	4	2375	10	2357	4	40,3		10	2388		2340		38,8			
	5	2357	11	2379	5	39,3		11	2415		2361		38,8			
	6	2365	12	2361	6	39,5		12	2394		2350		39,2			
		Ср. 2367		Ср. 2367		Ср. 39,8		Ср. 2398		Ср. 2351		Ср. 39,1				
Модифицированн ый, В50	13	2387	19	2390	13	56,3	49,01	19	2414	300	2386	1,29	55,4	54,17		
	14	2381	20	2386	14	56,7		20	2409		2378		55,6			
	15	2389	21	2388	15	55,8		21	2400		2372		54,4			
	16	2376	22	2374	16	56,4		22	2398		2366		55,5			
	17	2383	23	2379	17	55,2		23	2425		2387		55,4			
	18	2389	24	2382	18	55,5		24	2408		2376		55,5			
		Ср. 2384		Ср. 2383		Ср. 56,0		Ср. 2409		Ср. 2378		Ср. 55,3				
Модифицированн ый, В34	25	2367	31	2372	25	42,9	37,31	31	2410	300	2376	1,37	42,8	41,37		
	26	2369	32	2379	26	44,2		32	2405		2371		43,0			
	27	2371	33	2364	27	42,8		33	2397		2368		42,2			
	28	2366	34	2376	28	42,7		34	2395		2363		42,0			
	29	2378	35	2372	29	43,4		35	2422		2382		42,1			
	30	2375	36	2380	30	42,6		36	2403		2372		42,3			
		Ср. 2371		Ср. 2374		Ср. 43,1		Ср. 2405		Ср. 2372		Ср. 42,4				

Сравнительный анализ результатов таблицы 3.5 показывает, что контрольный состав бетона соответствует марке по морозостойкости F<sub>1200</sub>, дальнейшие испытания бетона на морозостойкость проводить не целесообразно, т.к. потери массы составили 1,96 % (при допустимом значении 2 %).

Модифицированный бетон без уменьшения расхода цемента соответствует марке по морозостойкости F<sub>1300</sub> и при этом потеря массы составляет 1,29 %.

При уменьшенном расходе цемента на 20 % и модификации бетона при помощи разработанной добавки морозостойкость соответствует марке F<sub>1300</sub>, при этом потеря массы меньше, чем у контрольного состава и составляет 1,37 %.

Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что повышение морозостойкости бетона при исследовании разработанной добавки обусловлено уплотнением его структуры в результате влияния пластифицирующего эффекта разработанной добавки, а также, возможно, в результате увеличения количества гидратных новообразований, образующихся в присутствии добавки

Уплотнение структуры бетона в присутствии добавки, по-видимому, обусловлено не только эффектом пластификации, но и образованием большего количества новых гидратных фаз, которые оказывают влияние на возникновение контактов между компонентами бетонного камня и формированием более прочной структуры бетона.

При уменьшении расхода цемента (состав № 3 модифицированный бетон) возможно образуется меньшее количество комплексных гидратных соединений, следствием чего является некоторое понижение плотности бетона, происходит большее водонасыщение, чем у состава № 2, но при этом потери массы после замораживания у состава №3 примерно на 5 % выше, чем у состава № 2. что подтверждает высказанное предположение.

Экспериментально установлено, что модифицированный бетон обладает повышенной морозостойкостью, которая на 50 % превышает морозостойкость контрольного состава.

### 3.2.2 Оценка водонепроницаемости бетона

Водонепроницаемость бетона оценивали по ГОСТ 12730.5-89. Для этого изготавливали образцы-цилиндры диаметром 150 мм и высотой 150 мм в количестве 6 шт. Твердение образцов осуществлялось в нормальных условиях в течение 28 суток и после этого образцы подвергались испытанию на водонепроницаемость, которое проводили на установке УВФ-6 (рисунок 3.5). Результаты испытаний представлены в таблице 3.6.



Рисунок 3.5 – Установка для определения водонепроницаемости УВФ-6

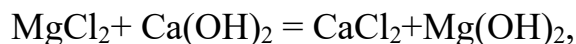
Таблица 3.6 – Результаты определения водонепроницаемости

Состав бетона	Фактический класс бетона, В	№ образца	Водонепроницаемость образца, МПа	Марка по водонепроницаемости, W	Примечание
Контрольный состав бетона	30	1	0,8	8	на поверхности образцов фильтрации воды нет
		2	0,8	8	
		3	0,8	8	
		4	0,8	8	
		5	0,8	8	
		6	0,8	8	
Модифицированный бетон	50	7	1,6	16	на поверхности образцов фильтрации воды нет
		8	1,6	16	
		9	1,6	16	
		10	1,6	16	
		11	1,6	16	
		12	1,6	16	
Модифицированный бетон с уменьшенным на 20 % расходом цемента	34	13	1,4	14	на поверхности образцов фильтрации воды нет
		14	1,4	14	
		15	1,4	14	
		16	1,4	14	
		17	1,4	14	
		18	1,4	14	

Анализ данных, представленных в таблице 3.6 показывает, что модифицированный бетон отличается более плотной структурой и характеризуется повышенным показателем водонепроницаемости. У модифицированного бетона при одинаковом расходе цемента водонепроницаемость увеличивается на 75 % и соответствует марке W16. При уменьшенном расходе цемента на 20 % водонепроницаемость бетона с добавкой соответствует марке W14, которая на 50 % превышает водонепроницаемость контрольного состава.

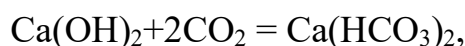
### 3.2.3 Оценка химической стойкости бетона

В грунтах, морской воде могут присутствовать уже растворённые соли магния  $MgCl_2$ , которые могут взаимодействовать с образовавшейся в процессе реакции гидратации гидролизной известью  $Ca(OH)_2$ , по реакции:



образуя продукты, которые не обладают вяжущими свойствами, под действием влаги они вымываются из состава бетона, что приводит к разрушению контактов в сформированной структуре, образованных при помощи  $Ca(OH)_2$ , ослабляя структуру бетона и понижает прочность бетона. В данном случае бетон подвергается магниальной коррозии.

Бетон при эксплуатации в большинстве случаев подвергается углекислотной коррозии, в процессе которой протекает следующая реакция:



в результате которой, образовавшийся в процессе гидратации портландцемента  $Ca(OH)_2$ , сформировавший определённые контактные связи в структуре бетона, в результате воздействия  $CO_2$  из воздуха образует соли бикарбоната кальция  $Ca(HCO_3)_2$ , которые под действием влаги достаточно легко вымываются из структуры бетона, разрушая сформированные контакты и, как следствие, понижая показатели прочности бетона.

Поэтому в данном исследовании оценивали химическую стойкость бетона в 5 % растворе  $Na_2CO_3$  и 5 % растворе  $MgCl_2$ .

Химическую стойкость бетона оценивали по ГОСТ Р 58896-2020. Для этого изготавливали семь серий образцов-балочек размером 4x4x16 см по три образца в каждой серии. Твердение образцов происходило в нормальных условиях в течение 28 суток. Перед погружением образцов в агрессивную среду штангенциркулем измеряли размеры, а также определяли массу образцов взвешиванием. Испытания образцов производили сериями: первую серию – до погружения в агрессивную среду, далее по одной серии после выдержки каждого предусмотренного срока. Образцы испытывали на растяжение при изгибе по ГОСТ 310.4-81.

Продолжительность выдерживания в среде и результаты испытаний приведены в таблице 3.7.

Коэффициент химической стойкости определяли по изменению прочности образцов на растяжение при изгибе после каждого срока выдержки

$$K_{x.c.} = R_t / R_0, \quad (3.2)$$

где  $R_0$  – предел прочности серии образцов на растяжение при изгибе, не погружавшихся в агрессивную среду;

$R_t$  – предел прочности серии образцов на растяжение при изгибе после выдержки в агрессивной среде в течение времени  $t$ , сут.

Уменьшение массы образцов после выдержки в среде не должно превышать 1 %. При уменьшении массы образцов более чем на 1 % состав бетона относят к нестойким в данной среде независимо от результатов механических испытаний.

Таблица 3.7 – Сравнительная оценка коэффициента химической стойкости бетона В30 контрольного состава и с разработанной комплексной добавкой

Вид агрессивной среды	Наименование бетона	Коэффициент химической стойкости, $K_{x.c.}$					
		Возраст, сут					
		30	60	90	180	270	360
3 % р-р $\text{Na}_2\text{CO}_3$	контрольный состав	0,98	0,94	0,92	0,63	0,43	0,39
	модифицированный бетон	1,12	1,09	1,07	0,99	0,91	0,87
5 % р-р $\text{MgCl}_2$	контрольный состав	0,98	0,96	0,92	0,62	0,41	0,37
	модифицированный бетон	1,10	1,07	1,05	0,98	0,92	0,86

Анализ данных таблицы 3.7 показывает, что модифицированный бетон в условиях углекислотной и магниальной коррозии остаётся химически стойким материалом, т.к. при нахождении бетона в течение 360 суток в условиях агрессивной среды коэффициент химической стойкости  $K_{x.c.} \geq 0,86$ , это значит, что в соответствии ГОСТ Р 58895-2020, бетон с таким значением коэффициента химической стойкости относится к высокостойким бетонам, контрольный состав

имеет значение  $K_{х.с.}$  0,37-0,39 и, соответственно, относится к относительно стойким бетонам.

### 3.3 Комплексные физико-химические исследования продуктов гидратации затвердевшего бетона

Для объяснения полученных положительных результатов по показателям прочности, трещиностойкости проведены комплексные физико-химические исследования при помощи рентгенофазового анализа и дифференциально-термического.

Для проведения рентгенофазового анализа продуктов гидратации бетона использовался рентгеновский дифрактометр Rigaku (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Рентгеновский дифрактометр Rigaku

Сравнительные рентгенофазовые исследования продуктов гидратации бетона 28 суточного возраста контрольного состава и бетона с разработанной комплексной химической добавкой (рисунок 3.7) показывают, что на рентгенограмме модифицированного бетона уменьшилась интенсивность линий,

относящихся к трёхкальциевому силикату  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $d/n=1,76; 1,94; 2,60; 2,73$ )  $\cdot 10^{-10}$  м, что свидетельствует о более высокой степени гидратации основного минерала портландцемента. На рентгенограмме модифицированного бетона повысилась интенсивность линий, относящихся к тоберморитоподобному гидросиликату типа CSH(I) ( $d/n=3,07; 2,80; 1,81$ )  $\cdot 10^{-10}$  м, а также появились новые линии, характерные для  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (афвиллита) ( $d/n=3,20; 4,71; 5,70$ )  $\cdot 10^{-10}$  м, который кристаллизуется в виде удлинённых призматических кристаллов и, в соответствии с литературными данными, обладает повышенной твёрдостью, равной 4,0 по шкале Мооса. Также обнаружены линии небольшой интенсивности, характерные для  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ( $d/n=4,93; 2,63; 1,93; 1,79$ )  $\cdot 10^{-10}$  м и низкоосновного гидросиликата типа окенита  $3\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ( $d/n=3,56; 2,93; 1,80$ )  $\cdot 10^{-10}$  м, который кристаллизуется в виде удлинённых волокон.

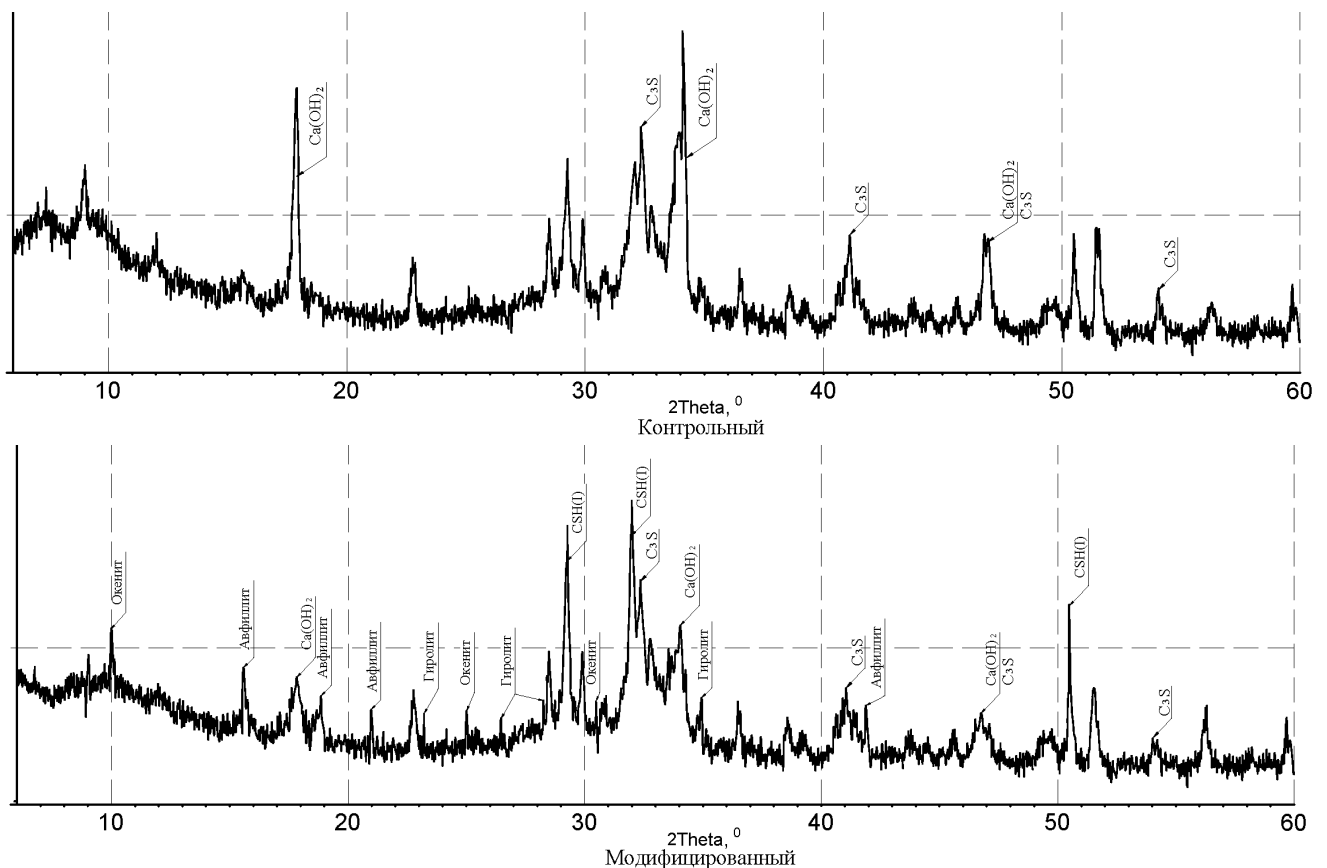


Рисунок 3.7 – Сравнительные рентгенограммы продуктов гидратации бетона 28 суточного возраста контрольного состава и бетона с разработанной комплексной химической добавкой



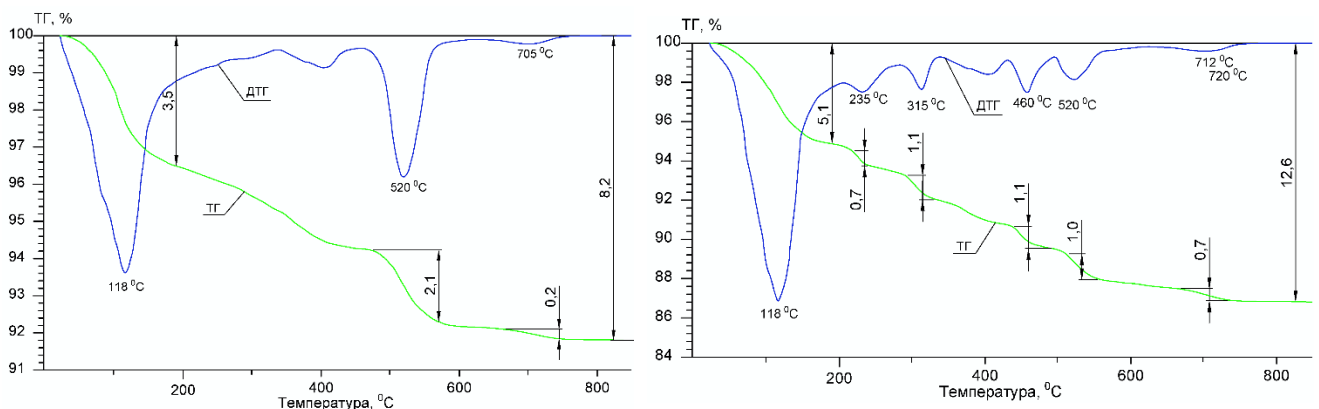
Отличительной особенностью продуктов гидратации модифицированного бетона по сравнению с контрольными образцами является пониженное содержание портландита, который, по-видимому, вступает в реакции синтеза с компонентом комплексной химической добавки, представленным нанодисперсиями диоксида кремния, образуя гидросиликаты, например, тоберморитоподобные, типа CSH(I), что является положительным и способствует повышению плотности бетона и, как следствие, химической стойкости и долговечности модифицированного бетонного камня.

Для проведения дифференциально-термических исследований бетона использовался дериватограф Derivatograph Q-1500 D (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Дериватограф Derivatograph Q-1500 D

Данные дериватографического исследования (рисунок 3.9) подтверждают результаты рентгенофазового анализа.



а) бетон контрольного состава

б) бетон, модифицированный комплексной химической добавкой

Рисунок 3.8 – Кривые ДТГ и ТГ бетона в возрасте 28 суток

Установлено, что в затвердевших образцах контрольного состава присутствует тоберморитоподобный гидросиликат CSH(I), что подтверждается широким эндоэффектом в области температур (142-190) °С и при  $t=705$  °С; наличие эндоэффекта в области температур (515, 520) °С характерно для дегидратации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , образующегося при гидратации трёхкальциевого силиката.

По результатам дифференциально-термического анализа модифицированного бетона обнаружена серия эндоэффектов, например, в области температур 160-185 °С и при 712 °С обусловлен дегидратацией тоберморитоподобных гидросиликатов, образующихся в повышенном количестве, эндоэффект в области температуры 720 °С соответствует дегидратации окенита  $3\text{CaO}\cdot6\text{SiO}_2\cdot6\text{H}_2\text{O}$ . Наличие эндоэффектов при температурах 235 °С, 315 °С и 460 °С, подтверждает образование в модифицированной твердеющей системе афвиллита  $3\text{CaO}\cdot2\text{SiO}_2\cdot3\text{H}_2\text{O}$ . Экзоэффект при температуре 820 °С, вероятно, обусловлен перекристаллизацией безводных силикатов, например, образующегося низкоосновного гидросиликата CSH(I), при соотношении  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 1$ , а также перекристаллизацией безводного афвиллита.

Результаты комплексных физико-химических исследований показали, что суммарные потери у затвердевшего бетона с комплексной химической добавкой на 54 % превышают суммарные потери бетона контрольного состава.

### 3.4 Выводы по главе

1 Разработанная комплексная химическая добавка в соответствии с ГОСТ 24211-2008 по основному эффекту действия относится к суперпластифицирующим и повышающим прочность добавкам, по дополнительному эффекту действия относится понижающим проницаемость, понижающим проницаемость, повышающим морозостойкость и коррозионную стойкость.

2 Использование разработанной комплексной химической добавки в рациональном количестве равном 1 % от массы цемента обеспечивает наибольший

рост прочности на растяжение при изгибе на 87 % и рост прочности на сжатие на 62 %, увеличивая коэффициент трещиностойкости материала более чем на 16 %.

3 Морозостойкость и водонепроницаемость бетона повышаются на 75 %.

4 Модифицированный бетон относительно углекислотной и магниевой коррозии относится к высокостойким бетонам, контрольный состав бетона относится к относительно стойким бетонам.

5 В присутствии разработанной комплексной химической добавки повышается степень гидратации основных минералов портландцемента и при этом появляются новые фазы, представленные комплексными гидратными соединениями типа афвиллита  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , а также окенита  $3\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , кристаллизующихся в виде удлинённых волокон и отличающихся повышенной прочностью и твёрдостью, оказывающих положительное влияние на повышение трещиностойкости бетона.

## ГЛАВА 4. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА К ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЮ

При эксплуатации стоек опор ВЛ наибольшую опасность, непосредственно влияющую на надёжность и долговечность конструкции, имеет ширина раскрытия трещин, которая зависит от прочности бетона на растяжение. Особенно негативно раскрытие трещин влияет на долговечность предварительно напряжённых железобетонных конструкций, в том числе и с высокопрочной арматурой класса А800, А1000 как в грунтовой водонасыщенной среде, так и в воздушной.

Для уменьшения ширины раскрытия трещин в настоящее время используют высокопрочную арматуру с повышенным усилием предварительного натяжения или повышенное количество арматуры. По-нашему мнению, данное мероприятие является недостаточно эффективным с технической и экономической точек зрения. Целесообразно для данного вида конструкций использовать бетон нового уровня свойств, отличающийся повышенной эластичностью и прочностью на растяжение.

Для подтверждения высказанного предположения о повышении трещиностойкости бетона для стоек опор ВЛ, изготовленных из модифицированного бетона с разработанной комплексной химической добавкой, произведены расчёты прочности поперечного сечения (допускаемый изгибающий момент  $M$ , кН·м) и деформативности (ширина раскрытия нормальных трещин  $a_{\text{срс}}$ , мм).

### 4.1 Оценка прочности и трещиностойкости стоек опор ВЛ

Для проведения расчётов принята стойка вибрированная СВ95-3с по типовому проекту 20.0139 АООТ «РОСЭП», а также стойка центрифугированная СК26.1-1.1 ГОСТ 22687, как наиболее распространённые.

Сравнительный расчёт вибрированной стойки СВ95-3с призматического сечения производился для бетона В30 контрольного состава с характеристиками, принятыми по СП 63.13330.2018, и бетона, модифицированного разработанной

комплексной химической добавкой, имеющего фактический класс В50 с соответствующими фактическими физико-механическими характеристиками.

Сравнительный расчёт центрифугированной стойки СК26.1-1.1 кольцевого сечения производился для бетона В40 контрольного состава с характеристиками, принятыми по СП 63.13330.2018, и бетона, модифицированного разработанной комплексной химической добавкой, имеющего фактический класс В65 с соответствующими фактическими физико-механическими характеристиками.

Расчёт несущей способности стоек производится в соответствии с СП 63.13330.2018 по нелинейной деформационной модели. Для расчёта использовались физико-механические характеристики модифицированного бетона, представленные в главе 3.

Следует отметить, что, при натурных испытаниях стоек опор ВЛ с консольным защемлением в испытательном стенде, значение ширины раскрытия трещин зачастую меньше расчётных значений.

Ширина раскрытия трещин рассчитывается по формуле:

$$a_{crc} = \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot l_s, \quad (4.1)$$

где  $\varphi_1$  - коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки, принимаемый равным:

1,0 - при непродолжительном действии нагрузки;

1,4 - при продолжительном действии нагрузки;

$\varphi_2$  - коэффициент, учитывающий профиль продольной арматуры, принимаемый равным:

0,5 - для арматуры периодического профиля и канатной;

0,8 - для гладкой арматуры;

$\varphi_3$  - коэффициент, учитывающий характер нагружения, принимаемый равным:

1,0 - для элементов изгибаемых и внецентренно сжатых;

1,2 - для растянутых элементов.

$\psi_s$  - коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами;

$E_s$  – начальный модуль упругости бетона.

$\sigma_s$  – приращение напряжений от момента образования трещин  $M_{crc}$  до момента по второй группе предельных состояний  $M_{II}$ ;

$l_s$  – базовое (без учёта влияния вида поверхности арматуры) расстояние между смежными нормальными трещинами.

Базовое расстояние между смежными нормальными трещинами  $l_s$  при постоянном изгибающем моменте на рассматриваемом участке конструкции определяется в соответствии с СП 63.13330.2018 по формуле:

$$l_s = 0,5 \cdot \frac{A_{bt}}{A_s} \cdot d_s, \quad (4.2)$$

где  $A_{bt}$  – площадь сечения растянутого бетона;

$A_s$  – площадь сечения растянутой арматуры;

$d_s$  – номинальный диаметр арматуры.

Однако, в случае, когда изгибающий момент имеет переменное значение по длине конструкции, например при консольном заземлении стоек опор ВЛ, фактическое значение шага трещин, определяемое натурными испытаниями, меньше примерно в 1,5-2 раза и не соответствует теоретическому значению. В этом случае фактический шаг трещин может быть уточнён исходя из теории анкеровки арматуры в бетоне.

Базовая длина анкеровки, необходимая для передачи усилия в арматуре с полным расчётным значением сопротивления  $R_s$  на бетон, определена по формуле:

$$l_{0,an} = \frac{R_s \cdot A_s}{R_{bond} \cdot u_s}, \quad (4.3)$$

где  $R_s$  – расчётное сопротивление арматуры растяжению;

$u_s$  – периметр поперечного сечения арматуры.

$R_{bond}$  - базовое (без учёта вида поверхности арматуры) сопротивление сцепления арматуры с бетоном, принимаемое в момент предельного сопротивления  $R_{bt,n}$ .

В момент трещинообразования растягивающие усилия в арматуре равны предельному сопротивлению бетона растянутой зоны в соответствии с уравнением:

$$\sigma_s \cdot A_s = A_{bt} \cdot R_{bt,n}, \quad (4.4)$$

где  $\sigma_s$  – напряжение в арматуре в момент трещинообразования;

$R_{bt,n}$  – нормативное сопротивление бетона на растяжение.

Соответственно, напряжение в арматуре в момент трещинообразования определяется по формуле:

$$\sigma_s = \frac{A_{bt} \cdot R_{bt,n}}{A_s}, \quad (4.5)$$

Принимая линейное распределение напряжений арматуры в бетоне при выдёргивании, получаем пропорцию:

$$\frac{R_s}{l_{0,an}} = \frac{\sigma_s}{l_s}, \quad (4.6)$$

Формула для определения шага трещин при консольном закреплении принимает вид:

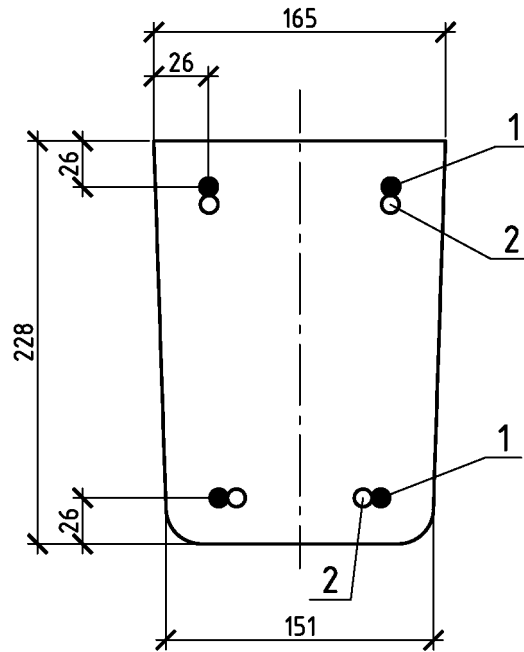
$$\begin{aligned} l_s &= \frac{l_{0,an} \cdot \sigma_s}{R_s} = \frac{R_s \cdot A_s \cdot A_{bt} \cdot R_{bt,n}}{R_{bt,n} \cdot u_s \cdot R_s \cdot A_s} = \frac{A_{bt}}{u_s} = \frac{A_{bt}}{\pi \cdot d_s} = \frac{A_{bt} \cdot \pi \cdot d_s}{\pi \cdot 4 \cdot A_s} = \\ &= \frac{A_{bt}}{4 \cdot A_s} \cdot d_s \end{aligned} \quad (4.7)$$

Таким образом, при консольном закреплении стоек при испытаниях шаг трещин может быть в два раза меньше, чем указано в СП 63.13330.2018, соответственно и ширина раскрытия трещин может быть в два раза меньше.

Приведённые теоретические выкладки согласуются с данными натурных испытаний стоек – шаг трещин при испытаниях стоек лежит в пределах от значения  $(A_{bt} \cdot d_s)/(4 \cdot A_s)$  до значения  $(A_{bt} \cdot d_s)/(2 \cdot A_s)$ , соответствующего СП 63.13330.2018.

#### 4.1.1 Расчёт показателей прочности и трещиностойкости вибрированной стойки СВ95-3с

Нормируемая несущая способность стойки СВ95-3с в плоскости наибольшей жёсткости составляет 30 кН·м. Расчётное сечение стойки представлено на рисунке 4.1.



1 - напрягаемая арматура d10A1000;

2 – ненапрягаемая арматура d10A1000;

контролируемое предварительное напряжение 870 МПа.

Рисунок 4.1 – Расчётное сечение стойки СВ95-3с

Расчётные показатели несущей способности и трещиностойкости стойки СВ95-3с представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Расчёт показателей прочности и трещиностойкости стойки СВ95-3с

Требуемый класс бетона	Фактический класс бетона	Наименование	Призмная прочность $R_{пр}$ , МПа	Нормативное сопротивление на сжатие призмы $R_{bn} = R_{пр} * 0,8$ , МПа	Расчётное сопротивление на сжатие призмы $R_b = R_{bn} / 1,3$ , МПа	Прочность на осевое растяжение $R_t$ , МПа	Нормативное сопротивление на растяжение $R_{bt,n} = R_t * 0,8$ , МПа	Расчётное сопротивление на растяжение $R_{bt} = R_{bt,n} / 1,5$ , МПа	Модуль упругости $E$ , МПа · $10^{-3}$	Изгибающий момент $M$ (несущая способность), кН · м	Момент трещинообразования, $M_{cr}$ , кН · м	Ширина раскрытия трещин при $M=24$ кНм, мм
V30	V30	контрольный состав	28,3	22,6	17,4	2,22	1,78	1,19	34,4	37,7	14,8	0,040
V30	V50	модифицированный бетон	51,2	41,0	31,5	3,36	2,90	1,93	42,2	47,3	16,8	0,031



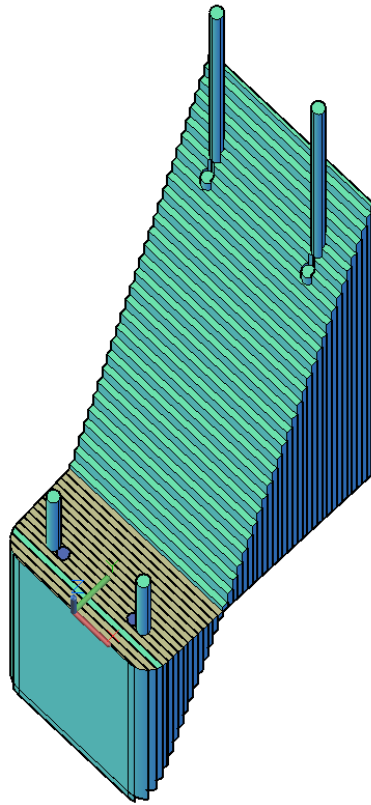


Рисунок 4.2 – Схема распределения относительных деформаций в сечении стойки СВ95-3с при действии предельного изгибающего момента

Анализ данных таблице 4.1 показывает, что разработанная комплексная химическая добавка повышает фактическую прочность на сжатие бетона от В30 до В50. При этом следует отметить, что значение призмной прочности относительно кубиковой имеет более высокую величину для модифицированного бетона, и отношение призмной прочности к кубиковой достигает 81 %, в то время как для контрольного состава призмная прочность составляет 72 % от кубиковой. Повышенная призмная прочность может быть обусловлена образованием в твердеющей системе новых комплексных гидратных соединений, кристаллизующихся в виде прочных волокон, оказывающих микроармирующее действие на формирующуюся структуру бетона, что обеспечивает более высокие показатели прочности на осевое растяжение для бетона с разработанной добавкой. Данное теоретическое рассуждение подтверждается экспериментальными данными.

Фактическая прочность на осевое растяжение для модифицированного бетона В50 составляет 3,63 МПа (при требуемом нормативном значении для бетона В50  $2,45 \cdot 1,28 = 3,14$  МПа), что превышает нормируемое значение для бетона класса В50 на 16 %.

Следствием формирования бетона, обладающего более прочной структурой, является повышенная несущая способность конструкций, подтверждаемая величиной изгибающего момента (таблица 4.1), и пониженная ширина раскрытия трещин, которая уменьшается на 22 % от значения 0,040 мм до значения 0,031 мм при одинаковом расходе цемента.

Результаты выполненных расчётов, представленные в таблице 4.1 показывают, что несущая способность стойки, определяемая предельным изгибающим моментом, с использованием модифицированного бетона ( $M=47,3$  кНм) на 25 % превышает несущую способность стойки при использовании бетона контрольного состава ( $M=37,7$  кНм).

Расчёты прочности и трещиностойкости предварительно напряжённой вибрированной стойки СВ95-3с произведены для наиболее нагруженного сечения, определяемого в соответствии с типовым проектом 20.0139 АООТ «РОСЭП» и ТУ 5863-007-96502166-2016 АО «НТЦ ФСК ЕЭС» на высоте 1,8 м от нижнего кобля.

Расчёты произведены в соответствии с СП 63.13330.2018 по нелинейной деформационной модели при помощи алгоритма, написанного в программе Excel+Basic.

### **Расчёт сечения стойки с использованием бетона В30 с фактическими физико-механическими характеристиками.**

<b><u>Информация о расчете</u></b>		
Характеристики материалов	Расчетные	
Точность расчета (% , кН (кН×м))	0,10%	0,10
Учитывать сопротивление растяжению бетона	Нет	
Максимальное количество итераций	750	
Учитывать вес материала при определении центра тяжести сечения	Нет	

<b>Информация о бетоне</b>		
Класс тяжелого бетона		V30 факт.
Относительная влажность воздуха окружающей среды, %		40 - 75
Действие нагрузки		Непродолжительное
Произведение коэффициентов условий работы $\gamma_{bi}$ [п. 6.1.12]		1,00
Произведение коэффициентов условий работы $\gamma_{bti}$ [п. 6.1.12]		1,00
Диаграмма состояния бетона		Трехлинейная
Начальный модуль упругости бетона, $E_b, E_{bt}$ , МПа [табл. 6.11]		34400
Модуль деформации бетона, $E_{bT}, E_{bTt}$ , МПа [табл. 6.11]		34400
Расчетное сопротивление осевому сжатию $R_b$ , МПа [табл. 6.7, 6.8]		17,4
Расчетное сопротивление осевому растяжению $R_{bt}$ , МПа [табл. 6.7, 6.8]		1,19
Сжатие с возможностью учета косвенного армирования [п 6.1.14, Приложение К]	Величина $\varepsilon_{b1}$	0,00030
	Величина $\varepsilon_{b1,red}$	0,00150
	Величина $\varepsilon_{b0}$	0,00200
	Величина $\varepsilon_{b2}$	0,00350
Растяжение [п 6.1.14]	Величина $\varepsilon_{bt1}$	0,00002
	Величина $\varepsilon_{bt1,red}$	0,00008
	Величина $\varepsilon_{bt0}$	0,00010
	Величина $\varepsilon_{bt2}$	0,00015
<b>Информация о ненапрягаемой арматуре</b>		
Класс продольной ненапрягаемой арматуры		A1000
Произведение коэффициентов условий работы $\gamma_{si}$		1,00
Диаграмма состояния арматуры		Трехлинейная (условный предел текучести)
Расчетное сопротивление арматуры растяжению $R_s$ , МПа [табл. 6.13, 6.14]		870
Расчетное сопротивление арматуры сжатию $R_{sc}$ , МПа [табл. 6.13, 6.14]		400
Модуль упругости арматуры, $E_s$ , МПа [п. 6.2.12]		2,00E+05
Величина $\varepsilon_{s0}$ [п. 6.2.11]		0,0064
Величина $\varepsilon_{s2}$ [п. 6.2.14, п. 6.2.15]		0,015
<b>Информация о напрягаемой арматуре</b>		
Класс продольной напрягаемой арматуры		A1000
Коэффициент, вводимый при расчете на прочность и учитывающий возможные отклонения предварительного напряжения $\gamma_{sp}$ (растяж/сжатие)		1,0      1,0
Диаграмма состояния арматуры		Трехлинейная (условный предел текучести)
Предварительное напряжение арматуры с учетом всех потерь $\sigma_{sp}$ , МПа		707,0
Расчетное сопротивление арматуры растяжению $R_s$ , МПа [табл. 6.13, 6.14]		870
Расчетное сопротивление арматуры сжатию $R_{sc}$ , МПа [табл. 6.13, 6.14]		400
Модуль упругости арматуры, $E_s$ , МПа [п. 6.2.12]		2,00E+05

Величина $\varepsilon_{s0}$ [п. 6.2.11]			0,0064	
Величина $\varepsilon_{s2}$ [п. 6.2.14, п. 6.2.15]			0,015	
<b>Информация об усилиях в сечении элемента</b>				
<b>Нагрузки</b>	<b>Заданные</b>	С учетом прогиба, $e_a$ и преднапряжения	<b>Полученные</b>	<b>Разница</b>
Нормальная сила, N, кН		-181,0	-180,8	0,10%
Изгибающий момент $M_x$ , кНм	0,0	0,0	0,0	-
Изгибающий момент $M_y$ , кНм	37,70	41,74	41,72	-0,03%
<b>Результаты расчета</b>				
Коэффициент использования сечения				0,994
<b>Геометрия сечения</b>				
Координата центра тяжести $X_c$ , мм				0,00
Координата центра тяжести $Y_c$ , мм				116,39
Габарит сечения по направлению оси X, мм				165,00
Габарит сечения по направлению оси Y, мм				228,16
Площадь сечения, A, см <sup>2</sup>				357,76
Площадь бетона сечения, A <sub>b</sub> , см <sup>2</sup>				351,48
Общая площадь арматуры в сечении, A <sub>s,tot</sub> , см <sup>2</sup>				6,28
Площадь пользовательского материала сечения, A <sub>u</sub> , см <sup>2</sup>				0,00
Площадь приведенного поперечного сечения, A <sub>red</sub> , см <sup>2</sup>				406,27
Площадь бетона	сжатой зоны, A <sub>b,c</sub> , см <sup>2</sup>			149,83
	растянутой зоны, A <sub>b,t</sub> , см <sup>2</sup>			201,64
Площадь ненапрягаемой арматуры	сжатой, A <sub>s,c</sub> , см <sup>2</sup>			1,57
	растянутой, A <sub>s,t</sub> , см <sup>2</sup>			1,57
Площадь напрягаемой арматуры	сжатой, A <sub>sp,c</sub> , см <sup>2</sup>			0,00
	растянутой, A <sub>sp,t</sub> , см <sup>2</sup>			3,14
Площадь пользовательского материала	сжатого, A <sub>u,c</sub> , см <sup>2</sup>			0,00
	растянутого, A <sub>u,t</sub> , см <sup>2</sup>			0,00
Момент инерции бетона	относительно оси X: I <sub>x</sub> , см <sup>4</sup>			14907,77
	относительно оси Y: I <sub>y</sub> , см <sup>4</sup>			470,83
Момент инерции ненапрягаемой арматуры	относительно оси X: I <sub>sx</sub> , см <sup>4</sup>			218,45
	относительно оси Y: I <sub>sy</sub> , см <sup>4</sup>			61,51
Момент инерции напрягаемой арматуры	относительно оси X: I <sub>spx</sub> , см <sup>4</sup>			243,89
	относительно оси Y: I <sub>spy</sub> , см <sup>4</sup>			74,88
Момент инерции пользовательского материала	относительно оси X: I <sub>ux</sub> , см <sup>4</sup>			0,00
	относительно оси Y: I <sub>uy</sub> , см <sup>4</sup>			0,00
Момент инерции приведенного сечения	относительно оси X: I <sub>red,x</sub> , см <sup>4</sup>			17595,80
	относительно оси Y: I <sub>red,y</sub> , см <sup>4</sup>			1263,80
<b>Расчет нелинейной деформационной модели</b>				
Кривизна 1/R <sub>x</sub> , м <sup>-1</sup>				0,0000000000
Кривизна 1/R <sub>y</sub> , м <sup>-1</sup>				0,0350529887
Относительная деформация волокна, расположенного в ЦТ сечения $\varepsilon_0$				0,0005854272

<b>Жесткости</b>	<b>Начальные</b>	<b>Окончательные</b>
D11, кН×м <sup>2</sup>	434,7	237,5
D22, кН×м <sup>2</sup>	6053,0	1361,1
D12, кН×м <sup>2</sup>	0,0	0,0
D13, кН×м	0,0	0,0
D23, кН×м	-499,3	-10225,2
	1334741,0	303363,4
<b>Критерий прочности</b>		
<b>Бетон</b>		
Минимальная относительная деформация в сечении, $\epsilon_{b,min}$	-0,003480	
Максимальная относительная деформация, $\epsilon_{b,max}$	0,004462	
Минимальное напряжение в сечении $\sigma_{b,min}$ , МПа	-17,40	
Максимальное напряжение в сечении $\sigma_{b,max}$ , МПа	0,00	
Предельное значение относительной деформации бетона при сжатии $\epsilon_{bult}$	-0,0035	
Предельное значение относительной деформации бетона при растяжении $\epsilon_{btult}$	0,00015	
Коэффициент использования сечения по критерию деформации сжатия бетона	0,994	
Коэффициент использования сечения по критерию деформации растяжения бетона	-	
<b>Ненапрягаемая арматура</b>		
Минимальная относительная деформация в сечении, $\epsilon_{s,min}$	-0,002582	
Максимальная относительная деформация, $\epsilon_{s,max}$	0,003242	
Минимальное напряжение в сечении $\sigma_{s,min}$ , МПа	-366,9	
Максимальное напряжение в сечении $\sigma_{s,max}$ , МПа	648,3	
Предельное значение относительной деформации арматуры $\epsilon_{sult}$	0,015	
Коэффициент использования сечения по критерию деформации сжатия ненапрягаемой арматуры	0,172	
Коэффициент использования сечения по критерию деформации растяжения ненапрягаемой арматуры	0,216	
<b>Напрягаемая арматура</b>		
Минимальная относительная деформация в сечении с учетом преднапряжения, $\epsilon_{sp,min}$	0,000952	
Минимальная относительная деформация в сечении с учетом преднапряжения, $\epsilon_{sp,max}$	0,007127	
Минимальное напряжение в сечении $\sigma_{min}$ , МПа	190,4	
Максимальное напряжение в сечении $\sigma_{max}$ , МПа	897,8	
Предельное значение относительной деформации арматуры $\epsilon_{spult}$	0,015	

Коэффициент использования сечения по критерию деформации сжатия напрягаемой арматуры	-
Коэффициент использования сечения по критерию деформации растяжения напрягаемой арматуры	0,475
<b>Пользовательский материал</b>	
Минимальная относительная деформация в сечении, $\epsilon_{\min}$	0,000000
Максимальная относительная деформация, $\epsilon_{\max}$	0,000000
Минимальное напряжение в сечении $\sigma_{\min}$ , МПа	0,0
Максимальное напряжение в сечении $\sigma_{\max}$ , МПа	0,0
Предельное значение относительной деформации сжатия $\epsilon_{ult-}$	-0,0067
Предельное значение относительной деформации растяжения $\epsilon_{sult+}$	0,0067
Коэффициент использования сечения по критерию деформации сжатия материала	-
Коэффициент использования сечения по критерию деформации растяжения материала	-
<b>Сечение</b>	
Общий коэффициент использования сечения по критерию относительных деформаций бетона, арматуры и пользовательского материала	0,994

14,80	кН*м	Момент трещинообразования
10,00	мм	Диаметр стержней арматуры
-47,85	мм	Центр тяжести сечения с учётом только сжатой зоны бетона
33840,90	см <sup>4</sup>	Момент инерции прив сечения с учётом только сж. Зоны бетона
48,26	мм	Расстояние от наиболее сжатого волокна до ц.т. прив. сеч. с учётом только сжатой зоны бетона
209,93	см <sup>2</sup>	Площадь приведённого сечения с учётом только сжатой зоны бетона
163,44	МПа	Приращение напряжений
28,34	см	Шаг трещин
722,51		Напряжения в арматуре при $M_{сгс}$
886,0	МПа	Напряжения в арматуре при $M_{II}$
0,3476		Коэффициент (по напряжениям $\sigma_{сгс}/\sigma$ ) $\psi$
0,040	мм	Ширина раскрытия трещин

**Расчёт сечения стойки с использованием модифицированного бетона В50 с фактическими физико-механическими характеристиками.**

<b><u>Информация о расчете</u></b>		
Характеристики материалов	Расчетные	
Точность расчета (% , кН (кН*м))	0,10%	0,10
Учитывать сопротивление растяжению бетона	Нет	
Максимальное количество итераций	750	
Учитывать вес материала при определении центра тяжести сечения	Нет	

<b>Информация о бетоне</b>		
Класс тяжелого бетона	B50m	
Относительная влажность воздуха окружающей среды, %	40 - 75	
Действие нагрузки	Непродолжительное	
Произведение коэффициентов условий работы $\gamma_{bi}$ [п. 6.1.12]	1,00	
Произведение коэффициентов условий работы $\gamma_{bti}$ [п. 6.1.12]	1,00	
Диаграмма состояния бетона	Трехлинейная	
Начальный модуль упругости бетона, $E_b, E_{bt}$ , МПа [табл. 6.11]	42200	
Модуль деформации бетона, $E_{bT}, E_{bTt}$ , МПа [табл. 6.11]	42200	
Расчетное сопротивление осевому сжатию $R_b$ , МПа [табл. 6.7, 6.8]	31,5	
Расчетное сопротивление осевому растяжению $R_{bt}$ , МПа [табл. 6.7, 6.8]	1,93	
Сжатие с возможностью учета косвенного армирования [п 6.1.14, Приложение К]	Величина $\varepsilon_{b1}$	0,00045
	Величина $\varepsilon_{b1,red}$	0,00150
	Величина $\varepsilon_{b0}$	0,00200
	Величина $\varepsilon_{b2}$	0,00350
Растяжение [п 6.1.14]	Величина $\varepsilon_{bt1}$	0,00003
	Величина $\varepsilon_{bt1,red}$	0,00008
	Величина $\varepsilon_{bt0}$	0,00010
	Величина $\varepsilon_{bt2}$	0,00015
<b>Информация о ненапрягаемой арматуре</b>		
Класс продольной ненапрягаемой арматуры	A1000	
Произведение коэффициентов условий работы $\gamma_{si}$	1,00	
Диаграмма состояния арматуры	Трехлинейная (условный предел текучести)	
Расчетное сопротивление арматуры растяжению $R_s$ , МПа [табл. 6.13, 6.14]	870	
Расчетное сопротивление арматуры сжатию $R_{sc}$ , МПа [табл. 6.13, 6.14]	400	
Модуль упругости арматуры, $E_s$ , МПа [п. 6.2.12]	2,00E+05	
Величина $\varepsilon_{s0}$ [п. 6.2.11]	0,0064	
Величина $\varepsilon_{s2}$ [п. 6.2.14, п. 6.2.15]	0,015	
<b>Информация о напрягаемой арматуре</b>		
Класс продольной напрягаемой арматуры	A1000	
Коэффициент, вводимый при расчете на прочность и учитывающий возможные отклонения предварительного напряжения $\gamma_{sp}$ (растяж/сжатие)	1,0      1,0	
Диаграмма состояния арматуры	Трехлинейная (условный предел текучести)	
Предварительное напряжение арматуры с учетом всех потерь $\sigma_{sp}$ , МПа	707,0	
Расчетное сопротивление арматуры растяжению $R_s$ , МПа [табл. 6.13, 6.14]	870	
Расчетное сопротивление арматуры сжатию $R_{sc}$ , МПа [табл. 6.13, 6.14]	400	
Модуль упругости арматуры, $E_s$ , МПа [п. 6.2.12]	2,00E+05	
Величина $\varepsilon_{s0}$ [п. 6.2.11]	0,0064	

Величина $\varepsilon_{s2}$ [п. 6.2.14, п. 6.2.15]			0,015	
<b>Информация об усилиях в сечении элемента</b>				
<b>Нагрузки</b>	<b>Заданные</b>	<b>С учетом прогиба, <math>e_s</math> и преднапряжения</b>	<b>Полученные</b>	<b>Разница</b>
Нормальная сила, N, кН		-164,8	-164,9	-0,08%
Изгибающий момент $M_x$ , кНм	0,0	0,0	0,0	-
Изгибающий момент $M_y$ , кНм	47,30	52,73	52,69	-0,08%
<b>Результаты расчета</b>				
Коэффициент использования сечения			0,996	
<b>Геометрия сечения</b>				
Координата центра тяжести $X_c$ , мм			0,00	
Координата центра тяжести $Y_c$ , мм			116,39	
Габарит сечения по направлению оси X, мм			165,00	
Габарит сечения по направлению оси Y, мм			228,16	
Площадь сечения, A, см <sup>2</sup>			357,76	
Площадь бетона сечения, A <sub>b</sub> , см <sup>2</sup>			351,48	
Общая площадь арматуры в сечении, A <sub>s,tot</sub> , см <sup>2</sup>			6,28	
Площадь пользовательского материала сечения, A <sub>u</sub> , см <sup>2</sup>			0,00	
Площадь приведенного поперечного сечения, A <sub>red</sub> , см <sup>2</sup>			396,14	
Площадь бетона	сжатой зоны, A <sub>b,c</sub> , см <sup>2</sup>		103,14	
	растянутой зоны, A <sub>b,t</sub> , см <sup>2</sup>		248,34	
Площадь ненапрягаемой арматуры	сжатой, A <sub>s,c</sub> , см <sup>2</sup>		1,57	
	растянутой, A <sub>s,t</sub> , см <sup>2</sup>		1,57	
Площадь напрягаемой арматуры	сжатой, A <sub>sp,c</sub> , см <sup>2</sup>		0,00	
	растянутой, A <sub>sp,t</sub> , см <sup>2</sup>		3,14	
Площадь пользовательского материала	сжатого, A <sub>u,c</sub> , см <sup>2</sup>		0,00	
	растянутого, A <sub>u,t</sub> , см <sup>2</sup>		0,00	
Момент инерции бетона	относительно оси X: I <sub>x</sub> , см <sup>4</sup>		14907,77	
	относительно оси Y: I <sub>y</sub> , см <sup>4</sup>		470,83	
Момент инерции ненапрягаемой арматуры	относительно оси X: I <sub>sx</sub> , см <sup>4</sup>		218,45	
	относительно оси Y: I <sub>sy</sub> , см <sup>4</sup>		61,51	
Момент инерции напрягаемой арматуры	относительно оси X: I <sub>spx</sub> , см <sup>4</sup>		243,89	
	относительно оси Y: I <sub>spy</sub> , см <sup>4</sup>		74,88	
Момент инерции пользовательского материала	относительно оси X: I <sub>ux</sub> , см <sup>4</sup>		0,00	
	относительно оси Y: I <sub>uy</sub> , см <sup>4</sup>		0,00	
Момент инерции приведенного сечения	относительно оси X: I <sub>red,x</sub> , см <sup>4</sup>		17098,96	
	относительно оси Y: I <sub>red,y</sub> , см <sup>4</sup>		1117,23	
<b>Расчет нелинейной деформационной модели</b>				
Кривизна 1/R <sub>x</sub> , м <sup>-1</sup>			-0,0000000001	
Кривизна 1/R <sub>y</sub> , м <sup>-1</sup>			0,0487948611	
Относительная деформация волокна, расположенного в ЦТ сечения $\varepsilon_0$			0,0021742105	
<b>Жесткости</b>			<b>Начальные</b>	<b>Окончательные</b>
D11, кНхм <sup>2</sup>			471,5	215,2



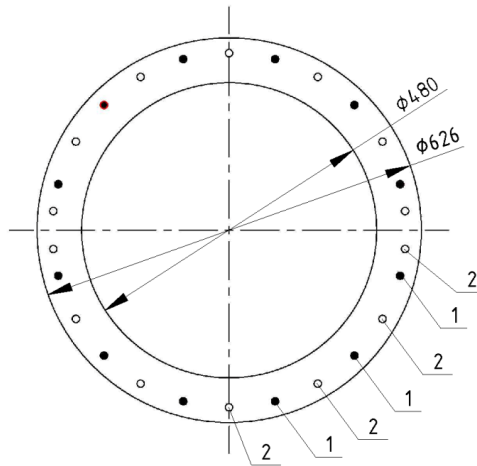
D22, кН×м <sup>2</sup>	7215,8	1843,3
D12, кН×м <sup>2</sup>	0,0	0,0
D13, кН×м	0,0	0,0
D23, кН×м	-475,8	-17134,8
	1608892,2	308709,1
<b>Критерий прочности</b>		
<b>Бетон</b>		
Минимальная относительная деформация в сечении, $\epsilon_{b,min}$	-0,003485	
Максимальная относительная деформация, $\epsilon_{b,max}$	0,007571	
Минимальное напряжение в сечении $\sigma_{b,min}$ , МПа	-31,50	
Максимальное напряжение в сечении $\sigma_{b,max}$ , МПа	0,00	
Предельное значение относительной деформации бетона при сжатии $\epsilon_{bult}$	-0,0035	
Предельное значение относительной деформации бетона при растяжении $\epsilon_{btult}$	0,00015	
Коэффициент использования сечения по критерию деформации сжатия бетона	0,996	
Коэффициент использования сечения по критерию деформации растяжения бетона	-	
<b>Ненапрягаемая арматура</b>		
Минимальная относительная деформация в сечении, $\epsilon_{s,min}$	-0,002235	
Максимальная относительная деформация, $\epsilon_{s,max}$	0,005872	
Минимальное напряжение в сечении $\sigma_{s,min}$ , МПа	-363,8	
Максимальное напряжение в сечении $\sigma_{s,max}$ , МПа	852,9	
Предельное значение относительной деформации арматуры $\epsilon_{sult}$	0,015	
Коэффициент использования сечения по критерию деформации сжатия ненапрягаемой арматуры	0,149	
Коэффициент использования сечения по критерию деформации растяжения ненапрягаемой арматуры	0,391	
<b>Напрягаемая арматура</b>		
Минимальная относительная деформация в сечении с учетом преднапряжения, $\epsilon_{sp,min}$	0,001299	
Минимальная относительная деформация в сечении с учетом преднапряжения, $\epsilon_{sp,max}$	0,009894	
Минимальное напряжение в сечении $\sigma_{min}$ , МПа	259,8	
Максимальное напряжение в сечении $\sigma_{max}$ , МПа	957,0	
Предельное значение относительной деформации арматуры $\epsilon_{spult}$	0,015	
Коэффициент использования сечения по критерию деформации сжатия напрягаемой арматуры	-	

Коэффициент использования сечения по критерию деформации растяжения напрягаемой арматуры	0,660
<b>Сечение</b>	
Общий коэффициент использования сечения по критерию относительных деформаций бетона, арматуры и пользовательского материала	0,996

16,80	кН*м	Момент трещинообразования
10,00	мм	Диаметр стержней арматуры
-52,95	мм	Центр тяжести сечения с учётом только сжатой зоны бетона
29844,46	см <sup>4</sup>	Момент инерции прив сечения с учётом только сж. Зоны бетона
53,36	мм	Расстояние от наиболее сжатого волокна до ц.т. прив. сеч. с учётом только сжатой зоны бетона
187,45	см <sup>2</sup>	Площадь приведённого сечения с учётом только сжатой зоны бетона
122,71	МПа	Приращение напряжений
30,84	см	Шаг трещин
724,24	МПа	Напряжения в арматуре при M <sub>сгс</sub>
847,0	МПа	Напряжения в арматуре при M <sub>II</sub>
0,3159		Коэффициент (по напряжениям $\sigma_{сгс}/\sigma$ ) $\psi$
0,031	мм	Ширина раскрытия трещин

### 4.1.2 Расчёт показателей прочности и трещиностойкости центрифугированной стойки СК26.1-1.1

Расчётное сечение центрифугированной стойки СК26.1-1.1 представлено на рисунке 4.3. Расчётные показатели изгибающего момента (несущей способности) и трещиностойкости стойки представлены в таблице 4.2.



1 - напрягаемая арматура d12A800;

2 – ненапрягаемая арматура d12A800;

контролируемое предварительное напряжение 700 МПа.

Рисунок 4.3 – Расчётное сечение стойки СК26.1-1.1

Расчётные показатели несущей способности и трещиностойкости стойки СК26.1-1.1 представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Расчёт показателей прочности и трещиностойкости стойки СК26.1-1.1

Требуемый класс бетона	Фактический класс бетона	Наименование	Призменная прочность $R_{пр}$ , МПа	Нормативное сопротивление на сжатие призмы $R_{bn} = R_{пр} * 0,8$ , МПа	Расчётное сопротивление на сжатие призмы $R_b = R_{bn} / 1,3$ , МПа	Прочность на осевое растяжение $R_t$ , МПа	Нормативное сопротивление на растяжение $R_{bt,n} = R_t * 0,8$ , МПа	Расчётное сопротивление на растяжение $R_{bt} = R_{bt,n} / 1,5$ , МПа	Модуль упругости $E$ , МПа. $10^{-3}$	Изгибающий момент $M$ (несущая способность), кН·м	Момент трещинообразования, $M_{тр}$ , кН·м	Ширина раскрытия трещин при $M_{тр} = 384$ кНм, мм
В40	В40	контрольный состав	37,2	29,8	22,9	2,62	2,10	1,40	36,0	458	171	0,135
В40	В65	модифицированный бетон	65,2	52,2	40,1	4,30	3,44	2,29	44,6	563	194	0,110

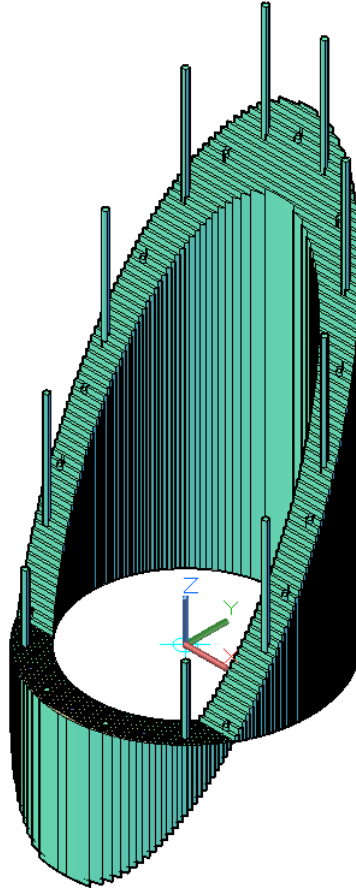


Рисунок 4.4 – Схема распределения относительных деформаций в сечении стойки СК26.1-1.1 при действии предельного изгибающего момента

Анализ данных таблицы 4.2 показывает, что показатели призмочной прочности и прочности на осевое растяжение для центрифугированного модифицированного бетона также имеют более высокие значения относительно контрольного состава в следствие формирования бетона, обладающего более прочной структурой, и обеспечивают уменьшение ширины раскрытия трещин на 19 % от значения 0,135 мм до значения 0,110 мм при одинаковом расходе цемента.

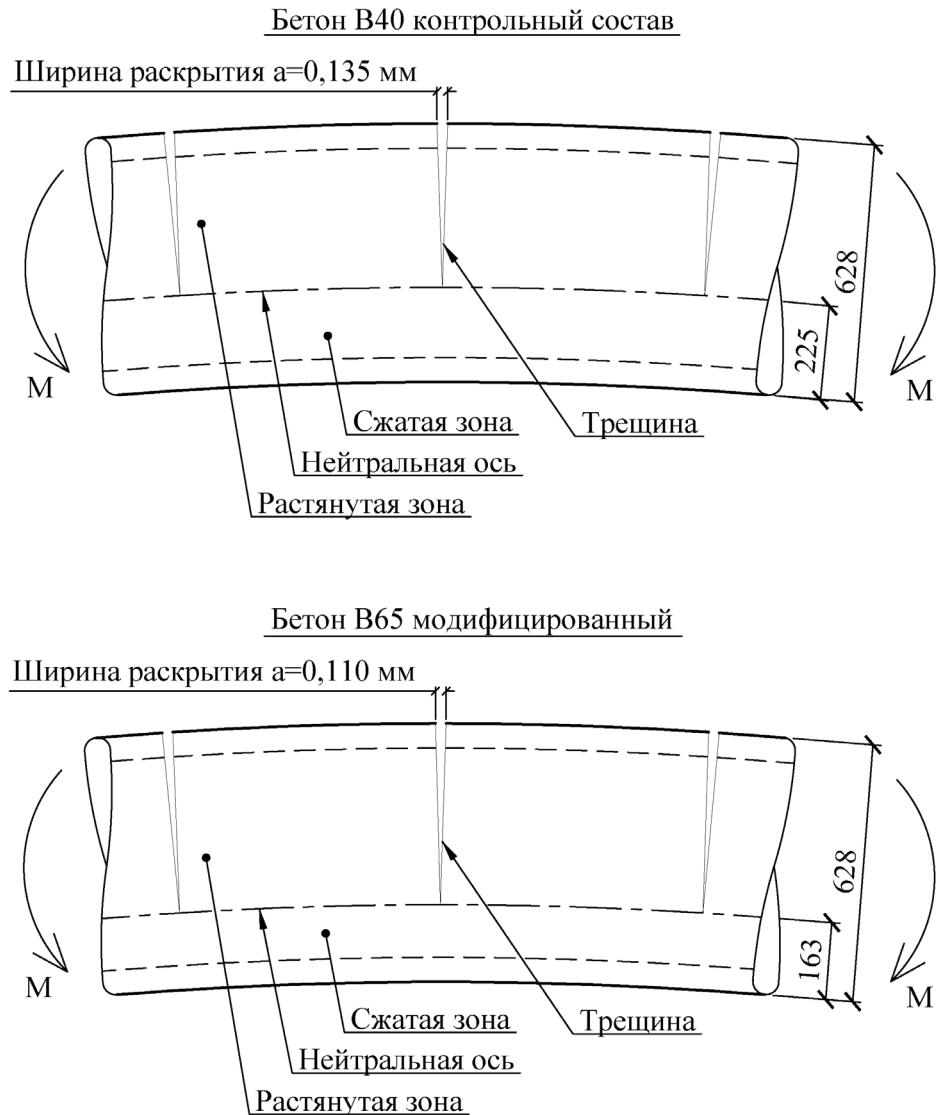


Рисунок 4.5 – Результаты расчёта ширины раскрытия трещин стойки СК26.1-1.1

При большей прочности бетона для восприятия действующего изгибающего момента необходима меньшая высота сжатой зоны бетона. В растянутую зону попадает большее количество арматурных стержней с увеличенным плечом относительно нейтральной оси - несущая способность сечения увеличивается.

Кроме уменьшения ширины раскрытия трещин повышается несущая способность конструкции, что является основанием для рассмотрения возможности снижения степени армирования при использовании бетона, модифицированного разработанной добавкой.

Результаты выполненных расчётов, представленные в таблице. 4.2, показывают, что несущая способность стойки, определяемая предельным изгибающим моментом, с использованием модифицированного бетона

( $M=563$  кНм) на 23 % превышает несущую способность стойки при использовании бетона контрольного состава ( $M=458$  кНм).

Расчёты прочности и трещиностойкости предварительно напряжённой центрифугированной стойки СК26.1-1.1 произведены для наиболее нагруженного сечения, определяемого в соответствии с ГОСТ 22687.1 на высоте 2,6 м от нижнего комля.

Расчёты произведены в соответствии с СП 63.13330.2018 по нелинейной деформационной модели при помощи алгоритма, написанного в программе Excel+Basic.

**Расчёт сечения стойки с использованием бетона В40 с фактическими физико-механическими характеристиками.**

<b><u>Информация о расчете</u></b>		
Характеристики материалов	Расчетные	
Точность расчета (%), кН (кН×м)	0,10%	0,10
Учитывать сопротивление растяжению бетона	Нет	
Максимальное количество итераций	750	
Учитывать вес материала при определении центра тяжести сечения	Нет	
<b><u>Информация о бетоне</u></b>		
Класс тяжелого бетона	В40 факт.	
Относительная влажность воздуха окружающей среды, %	40 - 75	
Действие нагрузки	Непродолжительное	
Произведение коэффициентов условий работы $\gamma_{bi}$ [п. 6.1.12]	1,00	
Произведение коэффициентов условий работы $\gamma_{bti}$ [п. 6.1.12]	1,00	
Диаграмма состояния бетона	Трехлинейная	
Начальный модуль упругости бетона, $E_b$ , $E_{bt}$ , МПа [табл. 6.11]	36000	
Модуль деформации бетона, $E_{bT}$ , $E_{bTt}$ , МПа [табл. 6.11]	36000	
Расчетное сопротивление осевому сжатию $R_b$ , МПа [табл. 6.7, 6.8]	22,9	
Расчетное сопротивление осевому растяжению $R_{bt}$ , МПа [табл. 6.7, 6.8]	1,40	
Сжатие с возможностью учета косвенного армирования [п 6.1.14, Приложение К]	Величина $\varepsilon_{b1}$	0,00038
	Величина $\varepsilon_{b1,red}$	0,00150
	Величина $\varepsilon_{b0}$	0,00200
	Величина $\varepsilon_{b2}$	0,00350
Растяжение [п 6.1.14]	Величина $\varepsilon_{bt1}$	0,00002
	Величина $\varepsilon_{bt1,red}$	0,00008
	Величина $\varepsilon_{bt0}$	0,00010
	Величина $\varepsilon_{bt2}$	0,00015
<b><u>Информация о ненапрягаемой арматуре</u></b>		

Класс продольной ненапрягаемой арматуры		A800		
Произведение коэффициентов условий работы $\gamma_{si}$		1,00		
Диаграмма состояния арматуры		Трехлинейная (условный предел текучести)		
Расчетное сопротивление арматуры растяжению $R_s$ , МПа [табл. 6.13, 6.14]		695		
Расчетное сопротивление арматуры сжатию $R_{sc}$ , МПа [табл. 6.13, 6.14]		400		
Модуль упругости арматуры, $E_s$ , МПа [п. 6.2.12]		2,00E+05		
Величина $\varepsilon_{s0}$ [п. 6.2.11]		0,0055		
Величина $\varepsilon_{s2}$ [п. 6.2.14, п. 6.2.15]		0,015		
<b>Информация о напрягаемой арматуре</b>				
Класс продольной напрягаемой арматуры		A800		
Коэффициент, вводимый при расчете на прочность и учитывающий возможные отклонения предварительного напряжения $\gamma_{sp}$ (растяж/сжатие)		1,0	1,0	
Диаграмма состояния арматуры		Трехлинейная (условный предел текучести)		
Предварительное напряжение арматуры с учетом всех потерь $\sigma_{sp}$ , МПа		561,0		
Расчетное сопротивление арматуры растяжению $R_s$ , МПа [табл. 6.13, 6.14]		695		
Расчетное сопротивление арматуры сжатию $R_{sc}$ , МПа [табл. 6.13, 6.14]		400		
Модуль упругости арматуры, $E_s$ , МПа [п. 6.2.12]		2,00E+05		
Величина $\varepsilon_{s0}$ [п. 6.2.11]		0,0055		
Величина $\varepsilon_{s2}$ [п. 6.2.14, п. 6.2.15]		0,015		
<b>Информация об усилиях в сечении элемента</b>				
<b>Нагрузки</b>	<b>Заданные</b>	С учетом прогиба, $e_s$ и преднапряжения	<b>Полученные</b>	<b>Разница</b>
Нормальная сила, N, кН		-586,1	-585,5	0,10%
Изгибающий момент $M_x$ , кНм	0,0	0,0	0,0	-
Изгибающий момент $M_y$ , кНм	458,00	458,00	458,00	0,00%
<b>Результаты расчета</b>				
Коэффициент использования сечения				0,996
<b>Геометрия сечения</b>				
Координата центра тяжести $X_c$ , мм				-0,01
Координата центра тяжести $Y_c$ , мм				0,03
Габарит сечения по направлению оси X, мм				626,00
Габарит сечения по направлению оси Y, мм				625,83
Площадь сечения, A, см <sup>2</sup>				1267,96
Площадь бетона сечения, A <sub>b</sub> , см <sup>2</sup>				1238,56
Общая площадь арматуры в сечении, A <sub>s,tot</sub> , см <sup>2</sup>				29,41
Площадь пользовательского материала сечения, A <sub>u</sub> , см <sup>2</sup>				0,00
Площадь приведенного поперечного сечения, A <sub>red</sub> , см <sup>2</sup>				1477,32
Площадь бетона	сжатой зоны, A <sub>b,c</sub> , см <sup>2</sup>			493,22
	растянутой зоны, A <sub>b,t</sub> , см <sup>2</sup>			745,33

Площадь ненапрягаемой арматуры	сжатой, $A_{s,c}$ , $\text{см}^2$	5,65
	растянутой, $A_{s,t}$ , $\text{см}^2$	10,18
Площадь напрягаемой арматуры	сжатой, $A_{sp,c}$ , $\text{см}^2$	2,26
	растянутой, $A_{sp,t}$ , $\text{см}^2$	11,31
Площадь пользовательского материала	сжатого, $A_{u,c}$ , $\text{см}^2$	0,00
	растянутого, $A_{u,t}$ , $\text{см}^2$	0,00
Момент инерции бетона	относительно оси X: $I_x$ , $\text{см}^4$	481787,20
	относительно оси Y: $I_y$ , $\text{см}^4$	445026,31
Момент инерции ненапрягаемой арматуры	относительно оси X: $I_{sx}$ , $\text{см}^4$	5671,56
	относительно оси Y: $I_{sy}$ , $\text{см}^4$	7459,85
Момент инерции напрягаемой арматуры	относительно оси X: $I_{spx}$ , $\text{см}^4$	5628,45
	относительно оси Y: $I_{spx}$ , $\text{см}^4$	5628,45
Момент инерции пользовательского материала	относительно оси X: $I_{ux}$ , $\text{см}^4$	0,00
	относительно оси Y: $I_{uy}$ , $\text{см}^4$	0,00
Момент инерции приведенного сечения	относительно оси X: $I_{red,x}$ , $\text{см}^4$	544565,03
	относительно оси Y: $I_{red,y}$ , $\text{см}^4$	517739,08
<b>Расчет нелинейной деформационной модели</b>		
Кривизна $1/R_x$ , $\text{м}^{-1}$		-0,0000006710
Кривизна $1/R_y$ , $\text{м}^{-1}$		0,0155404086
Относительная деформация волокна, расположенного в ЦТ сечения $\varepsilon_0$		0,0013180003
<b>Жесткости</b>		<b>Начальные</b>
		<b>е</b>
		<b>Окончательны</b>
		<b>е</b>
D11, $\text{кН}\times\text{м}^2$		186386,1
D22, $\text{кН}\times\text{м}^2$		196043,4
D12, $\text{кН}\times\text{м}^2$		8,8
D13, $\text{кН}\times\text{м}$		6,7
D23, $\text{кН}\times\text{м}$		-13,6
		5046909,2
		1153688,2
<b>Критерий прочности</b>		
<b>Бетон</b>		
Минимальная относительная деформация в сечении, $\varepsilon_{b,min}$		-0,003486
Максимальная относительная деформация, $\varepsilon_{b,max}$		0,006174
Минимальное напряжение в сечении $\sigma_{b,min}$ , МПа		-22,90
Максимальное напряжение в сечении $\sigma_{b,max}$ , МПа		0,00
Предельное значение относительной деформации бетона при сжатии $\varepsilon_{bult}$		-0,0035
Предельное значение относительной деформации бетона при растяжении $\varepsilon_{btult}$		0,00015
Коэффициент использования сечения по критерию деформации сжатия бетона		0,996
Коэффициент использования сечения по критерию деформации растяжения бетона		-



<b>Ненапрягаемая арматура</b>	
Минимальная относительная деформация в сечении, $\epsilon_{s,min}$	-0,003158
Максимальная относительная деформация, $\epsilon_{s,max}$	0,005793
Минимальное напряжение в сечении $\sigma_{s,min}$ , МПа	-374,8
Максимальное напряжение в сечении $\sigma_{s,max}$ , МПа	704,4
Предельное значение относительной деформации арматуры $\epsilon_{sult}$	0,015
Коэффициент использования сечения по критерию деформации сжатия ненапрягаемой арматуры	0,211
Коэффициент использования сечения по критерию деформации растяжения ненапрягаемой арматуры	0,386
<b>Напрягаемая арматура</b>	
Минимальная относительная деформация в сечении с учетом преднапряжения, $\epsilon_{sp,min}$	-0,000201
Минимальная относительная деформация в сечении с учетом преднапряжения, $\epsilon_{sp,max}$	0,008446
Минимальное напряжение в сечении $\sigma_{min}$ , МПа	-40,1
Максимальное напряжение в сечении $\sigma_{max}$ , МПа	764,5
Предельное значение относительной деформации арматуры $\epsilon_{spult}$	0,015
Коэффициент использования сечения по критерию деформации сжатия напрягаемой арматуры	0,013
Коэффициент использования сечения по критерию деформации растяжения напрягаемой арматуры	0,563
<b>Сечение</b>	
Общий коэффициент использования сечения по критерию относительных деформаций бетона, арматуры и пользовательского материала	0,996

171,00	кН*м	Момент трещинообразования
12,00	мм	Диаметр стержней арматуры
-157,57	мм	Центр тяжести сечения с учётом только сжатой зоны бетона
135715,41	см <sup>4</sup>	Момент инерции прив сечения с учётом только сж. Зоны бетона
151,56	мм	Расстояние от наиболее сжатого волокна до ц.т. прив. сеч. с учётом только сжатой зоны бетона
666,18	см <sup>2</sup>	Площадь приведённого сечения с учётом только сжатой зоны бетона
526,37	МПа	Приращение напряжений
25,27	см	Шаг трещин
584,53	МПа	Напряжения в арматуре при M <sub>сгс</sub>
785,1	МПа	Напряжения в арматуре при M <sub>II</sub>
0,4044		Коэффициент (по напряжениям $\sigma_{сгс}/\sigma$ ) $\psi$
0,135	мм	Ширина раскрытия трещин

**Расчёт сечения стойки с использованием модифицированного бетона В60 с фактическими физико-механическими характеристиками.**

<b>Информация о расчете</b>		
Характеристики материалов		Расчетные
Точность расчета (% , кН (кН×м))	0,10%	0,10
Учитывать сопротивление растяжению бетона	Нет	
Максимальное количество итераций	750	
Учитывать вес материала при определении центра тяжести сечения	Нет	
<b>Информация о бетоне</b>		
Класс тяжелого бетона	В65м	
Относительная влажность воздуха окружающей среды, %	40 - 75	
Действие нагрузки	Непродолжительное	
Произведение коэффициентов условий работы $\gamma_{bi}$ [п. 6.1.12]	1,00	
Произведение коэффициентов условий работы $\gamma_{bti}$ [п. 6.1.12]	1,00	
Диаграмма состояния бетона	Трехлинейная	
Начальный модуль упругости бетона, $E_b, E_{bt}$ , МПа [табл. 6.11]	44600	
Модуль деформации бетона, $E_{bT}, E_{bTt}$ , МПа [табл. 6.11]	44600	
Расчетное сопротивление осевому сжатию $R_b$ , МПа [табл. 6.7, 6.8]	40,1	
Расчетное сопротивление осевому растяжению $R_{bt}$ , МПа [табл. 6.7, 6.8]	2,29	
Сжатие с возможностью учета косвенного армирования [п 6.1.14, Приложение К]	Величина $\varepsilon_{b1}$	0,00054
	Величина $\varepsilon_{b1,red}$	0,00150
	Величина $\varepsilon_{b0}$	0,00200
	Величина $\varepsilon_{b2}$	0,00350
Растяжение [п 6.1.14]	Величина $\varepsilon_{bt1}$	0,00003
	Величина $\varepsilon_{bt1,red}$	0,00008
	Величина $\varepsilon_{bt0}$	0,00010
	Величина $\varepsilon_{bt2}$	0,00015
<b>Информация о ненапрягаемой арматуре</b>		
Класс продольной ненапрягаемой арматуры	А800	
Произведение коэффициентов условий работы $\gamma_{si}$	1,00	
Диаграмма состояния арматуры	Трехлинейная (условный предел текучести)	
Расчетное сопротивление арматуры растяжению $R_s$ , МПа [табл. 6.13, 6.14]	695	
Расчетное сопротивление арматуры сжатию $R_{sc}$ , МПа [табл. 6.13, 6.14]	400	
Модуль упругости арматуры, $E_s$ , МПа [п. 6.2.12]	2,00E+05	
Величина $\varepsilon_{s0}$ [п. 6.2.11]	0,0055	
Величина $\varepsilon_{s2}$ [п. 6.2.14, п. 6.2.15]	0,015	
<b>Информация о напрягаемой арматуре</b>		
Класс продольной напрягаемой арматуры	А800	

Коэффициент, вводимый при расчете на прочность и учитывающий возможные отклонения предварительного напряжения $\gamma_{sp}$ (растяж/сжатие)	1,0	1,0		
Диаграмма состояния арматуры	Трехлинейная (условный предел текучести)			
Предварительное напряжение арматуры с учетом всех потерь $\sigma_{sp}$ , МПа	561,0			
Расчетное сопротивление арматуры растяжению $R_s$ , МПа [табл. 6.13, 6.14]	695			
Расчетное сопротивление арматуры сжатию $R_{sc}$ , МПа [табл. 6.13, 6.14]	400			
Модуль упругости арматуры, $E_s$ , МПа [п. 6.2.12]	2,00E+05			
Величина $\varepsilon_{s0}$ [п. 6.2.11]	0,0055			
Величина $\varepsilon_{s2}$ [п. 6.2.14, п. 6.2.15]	0,015			
<b>Информация об усилиях в сечении элемента</b>				
<b>Нагрузки</b>	<b>Заданные</b>	<b>С учетом прогиба, <math>e_a</math> и преднапряжения</b>	<b>Полученные</b>	<b>Разница</b>
Нормальная сила, N, кН		-494,0	-494,4	-0,09%
Изгибающий момент $M_x$ , кНм	0,0	0,0	0,0	-
Изгибающий момент $M_y$ , кНм	563,00	563,00	563,00	0,00%
<b>Результаты расчета</b>				
Коэффициент использования сечения			0,990	
<b>Геометрия сечения</b>				
Координата центра тяжести $X_c$ , мм			-0,01	
Координата центра тяжести $Y_c$ , мм			0,03	
Габарит сечения по направлению оси X, мм			626,00	
Габарит сечения по направлению оси Y, мм			626,00	
Площадь сечения, $A$ , см <sup>2</sup>			1267,96	
Площадь бетона сечения, $A_b$ , см <sup>2</sup>			1238,56	
Общая площадь арматуры в сечении, $A_{s,tot}$ , см <sup>2</sup>			29,41	
Площадь пользовательского материала сечения, $A_u$ , см <sup>2</sup>			0,00	
Площадь приведенного поперечного сечения, $A_{red}$ , см <sup>2</sup>			1431,28	
Площадь бетона	сжатой зоны, $A_{b,c}$ , см <sup>2</sup>		393,72	
	растянутой зоны, $A_{b,t}$ , см <sup>2</sup>		844,84	
Площадь ненапрягаемой арматуры	сжатой, $A_{s,c}$ , см <sup>2</sup>		3,39	
	растянутой, $A_{s,t}$ , см <sup>2</sup>		12,44	
Площадь напрягаемой арматуры	сжатой, $A_{sp,c}$ , см <sup>2</sup>		0,00	
	растянутой, $A_{sp,t}$ , см <sup>2</sup>		13,57	
Площадь пользовательского материала	сжатого, $A_{u,c}$ , см <sup>2</sup>		0,00	
	растянутого, $A_{u,t}$ , см <sup>2</sup>		0,00	
Момент инерции бетона	относительно оси X: $I_x$ , см <sup>4</sup>		481787,20	
	относительно оси Y: $I_y$ , см <sup>4</sup>		445026,31	
Момент инерции ненапрягаемой арматуры	относительно оси X: $I_{sx}$ , см <sup>4</sup>		5671,56	
	относительно оси Y: $I_{sy}$ , см <sup>4</sup>		7459,85	
Момент инерции напрягаемой арматуры	относительно оси X: $I_{spx}$ , см <sup>4</sup>		5628,45	
	относительно оси Y: $I_{spx}$ , см <sup>4</sup>		5628,45	
	относительно оси X: $I_{ux}$ , см <sup>4</sup>		0,00	

Момент инерции пользовательского материала	относительно оси Y: $I_{uy}, \text{см}^4$	0,00
Момент инерции приведенного сечения	относительно оси X: $I_{red,x}, \text{см}^4$	532459,89
	относительно оси Y: $I_{red,y}, \text{см}^4$	503718,23
<b>Расчет нелинейной деформационной модели</b>		
Кривизна $1/R_x, \text{м}^{-1}$		0,0000002538
Кривизна $1/R_y, \text{м}^{-1}$		0,0221106810
Относительная деформация волокна, расположенного в ЦТ сечения $\epsilon_0$		0,0033716710
<b>Жесткости</b>		<b>Начальные</b>
		<b>Окончательные</b>
D11, кН×м <sup>2</sup>		224658,3
D22, кН×м <sup>2</sup>		237477,1
D12, кН×м <sup>2</sup>		10,9
D13, кН×м		6,4
D23, кН×м		-12,9
		6112067,7
		1335792,8
<b>Критерий прочности</b>		
<b>Бетон</b>		
Минимальная относительная деформация в сечении, $\epsilon_{b,min}$		-0,003464
Максимальная относительная деформация, $\epsilon_{b,max}$		0,010281
Минимальное напряжение в сечении $\sigma_{b,min}$ , МПа		-40,10
Максимальное напряжение в сечении $\sigma_{b,max}$ , МПа		0,00
Предельное значение относительной деформации бетона при сжатии $\epsilon_{bult}$		-0,0035
Предельное значение относительной деформации бетона при растяжении $\epsilon_{btult}$		0,00015
Коэффициент использования сечения по критерию деформации сжатия бетона		0,990
Коэффициент использования сечения по критерию деформации растяжения бетона		-
<b>Ненапрягаемая арматура</b>		
Минимальная относительная деформация в сечении, $\epsilon_{s,min}$		-0,002997
Максимальная относительная деформация, $\epsilon_{s,max}$		0,009739
Минимальное напряжение в сечении $\sigma_{s,min}$ , МПа		-373,0
Максимальное напряжение в сечении $\sigma_{s,max}$ , МПа		764,5
Предельное значение относительной деформации арматуры $\epsilon_{sult}$		0,015
Коэффициент использования сечения по критерию деформации сжатия ненапрягаемой арматуры		0,200
Коэффициент использования сечения по критерию деформации растяжения ненапрягаемой арматуры		0,649
<b>Напрягаемая арматура</b>		
Минимальная относительная деформация в сечении с учетом преднапряжения, $\epsilon_{sp,min}$		0,000025

Минимальная относительная деформация в сечении с учетом преднапряжения, $\varepsilon_{sp,max}$	0,012327
Минимальное напряжение в сечении $\sigma_{min}$ , МПа	5,0
Максимальное напряжение в сечении $\sigma_{max}$ , МПа	764,5
Предельное значение относительной деформации арматуры $\varepsilon_{spult}$	0,015
Коэффициент использования сечения по критерию деформации сжатия напрягаемой арматуры	-
Коэффициент использования сечения по критерию деформации растяжения напрягаемой арматуры	0,822
<b>Сечение</b>	
Общий коэффициент использования сечения по критерию относительных деформаций бетона, арматуры и пользовательского материала	0,990

194,00	кН*м	Момент трещинообразования
12,00	мм	Диаметр стержней арматуры
-172,92	мм	Центр тяжести сечения с учётом только сжатой зоны бетона
112347,87	см <sup>4</sup>	Момент инерции прив сечения с учётом только сж. Зоны бетона
136,21	мм	Расстояние от наиболее сжатого волокна до ц.т. прив. сеч. с учётом только сжатой зоны бетона
565,56	см <sup>2</sup>	Площадь приведённого сечения с учётом только сжатой зоны бетона
443,90	МПа	Приращение напряжений
25,27	см	Шаг трещин
585,01	МПа	Напряжения в арматуре при M <sub>сгс</sub>
771,5	МПа	Напряжения в арматуре при M <sub>II</sub>
0,3934		Коэффициент (по напряжениям $\sigma_{сгс}/\sigma$ ) $\psi$
0,110	мм	Ширина раскрытия трещин

Использование данных таблицы 4.2 позволило произвести расчёт требуемого количества арматуры, в соответствии с СП 63.13330.2018, для рационального восприятия расчётной нагрузки. Произведённые расчёты показали, что использование высокопрочного модифицированного бетона позволяет сократить армирование стойки путём сокращения ненапрягаемой арматуры в нижней части стойки на 11 стержней диаметром 12 мм (11d12A800 ГОСТ 34028-2016) при увеличении класса арматуры до A1000 с увеличением усилия предварительного натяжения до 900 МПа, при этом несущая способность модифицированной стойки не уступает несущей способности стойки по ГОСТ ГОСТ22687.1. Общее снижение расхода рабочей продольной арматуры составило 122,7 кг при начальном расходе арматуры 459,2 кг, что составляет 27 %.

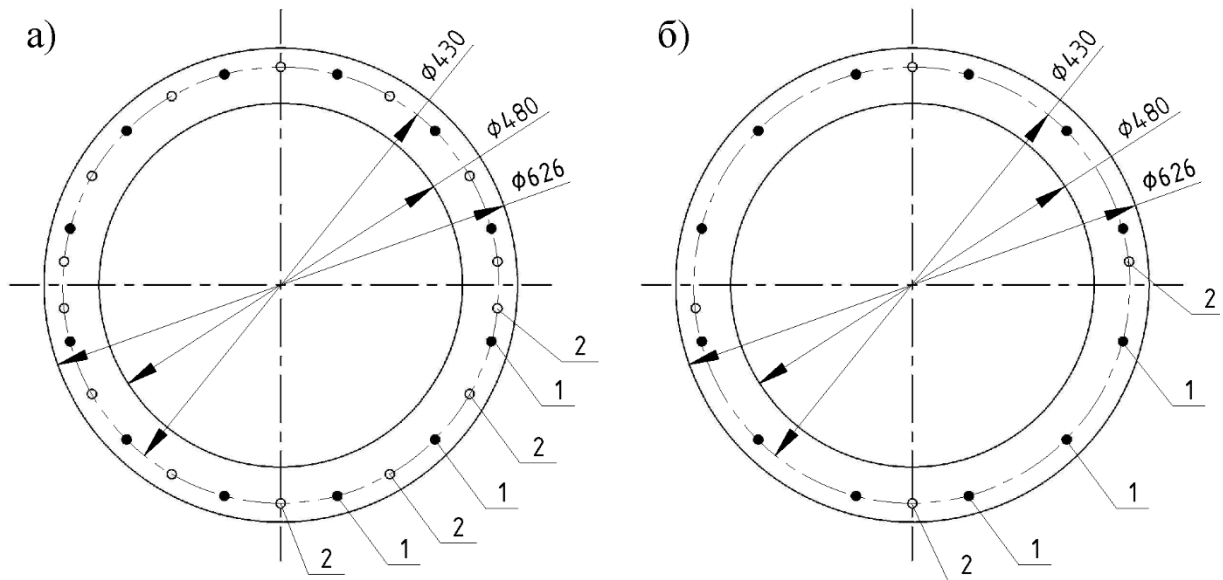
Расчёт себестоимости стойки СК26.1-1.1, выполненной по ГОСТ 22687.1 и с использованием модифицированного бетона представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Расчёт себестоимости стойки СК26.1-1.1 выполненной по ГОСТ 22687.1 и модифицированной

№ п/п	Материал	СК26.1-1.1 ГОСТ 22687.1-85		СК26.1-1.1 модифицированная	
		Кол-во	Стоимость, т.р.	Кол-во	Стоимость, т.р.
1	Бетон, м	2,5 м <sup>3</sup>	10,000	2,5 м <sup>3</sup>	10,00
2	Арматура d12A800, кг	459,2	36,277	-	-
	Арматура d12A1000, кг	-	-	336,5	27,256
3	Арматура d8A240, кг	25,7	1,928	25,7	1,928
4	Арматура d4B500, кг	58,4	4,380	58,4	4,380
5	Добавка, л	-	-	10,5	0,630
	Итого:		52,585		44,194
Приняты следующие цены: 1- Бетон В40 – 4 т.р./м <sup>3</sup> (расход цемента 420 кг/м <sup>3</sup> ); 2- Арматура А800 – 79 т.р/т; 3- Арматура А1000 – 81 т.р/т; 4- Арматура А240 – 75 т.р/т; 5- Арматура В500 – 75 т.р/т; 6- Добавка в бетон – 60 р/л (расход 1 кг на 100 кг цемента).					

Анализ данных таблицы 4.3 показывает, что стоимость модифицированной стойки СК26.1-1.1 ниже стоимости аналогичной стойки по ГОСТ22687.1 на 16,0 %.

На рисунке 4.6 представлены схемы армирования стойки СК26.1-1.1 с использованием бетона контрольного состава и модифицированного.



- 1 - напрягаемая арматура;  
2 - ненапрягаемая арматура.

а) исходное армирование, бетон В40, предварительное напряжение 700 МПа, арматура А800;

б) облегчённое армирование, бетон В65 модифицированный, предварительное напряжение 900 МПа, арматура А1000.

Рисунок 4.6 – Варианты армирования стойки СК26.1-1.1

По результатам проведённых исследований установлено, что разработанная добавка является эффективной независимо от технологии изготовления стоек опор (вибрирование или центрифугирование).

## 4.2 Выводы по главе

Экспериментально установлено, что бетон с разработанной комплексной химической добавкой, содержащей нанодисперсии гидроксида кремния, отличается улучшенными показателями трещиностойкости и несущей способности за счёт формирования структуры нового качества и создания высокоэффективного бетона:

- фактическая прочность на сжатие модифицированного бетона повышается от проектного класса В30 до класса В 50 (для вибрированных стоек) и от проектного класса В40 до класса В65 (для центрифугированных стоек);

– в результате образования новых труднорастворимых комплексных гидратных соединений призмная прочность модифицированного бетона составляет примерно 81 % от прочности на сжатие, в то время как для контрольного состава данное соотношение составляет примерно 72 %, модуль упругости модифицированного бетона проектного класса В30 повышается 23 % и достигает значения  $42,2 \cdot 10^3$  МПа, и проектного класса В40 повышается на 24 % и достигает значения  $44,6 \cdot 10^3$  МПа;

– определено, что предварительно напряжённые железобетонные изделия, представленные вибрированной и центрифугированной стойками, изготовленные из модифицированного бетона, характеризующегося повышенным значением прочности на осевое растяжение и сжатие, отличаются уменьшением на 19-22 % ширины раскрытия трещин;

– использование бетона с разработанной добавкой обеспечивает повышение несущей способности (изгибающего момента) предварительно напряжённых вибрированных и центрифугированных стоек на (23-25) %, следствием чего является повышение надёжности типовых железобетонных изделий, что допускает уменьшение степени армирования, на примере центрифугированной стойки СК 26.1-1.1, в пределах 27 %;

– результаты проведённых исследований подтверждают, что разработанная добавка является эффективной независимо от технологии изготовления стоек опор (вибрирование или центрифугирование) и обеспечивает повышение надёжности и долговечности железобетонных изделий.



## **ГЛАВА 5. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЙ ВЫПУСК. СХОДИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЁТОВ**

На объектах Национальной энергетической системы используются стойки опор длиной от 9,5 м до 26 м прямоугольного и кольцевого сечения.

В зависимости от длины стойки на заводах используется две технологии изготовления. Стойки призматического поперечного сечения длиной 9,5 – 16,4 м изготавливают методом вибрирования. Для этого используют бетон класса по прочности на сжатие В30 F<sub>1200</sub> W6.

Стойки круглого поперечного сечения длиной 20 – 26 м изготавливаются методом центрифугирования. Для данной технологии используется бетон класса по прочности на сжатие В40 – В60 с маркой по водонепроницаемости не менее W6 и маркой по морозостойкости не менее F<sub>1200</sub>.

### **5.1 Опытно-промышленный выпуск и определение физико-механических характеристик вибрированных стоек СВ95-3с**

Полученные положительные результаты при проведении научных исследований показали, что разработанная комплексная химическая добавка по основному эффекту действия относится к суперпластифицирующей, суперводоредуцирующей, повышающей прочность и по дополнительному эффекту действия снижает проницаемость бетона, повышает морозостойкость бетона, то есть его долговечность.

Для дополнительного подтверждения результатов научных исследований произведено опытно-промышленное изготовление стоек ВЛ из модифицированного бетона на заводе ООО «Рыбинскэнергожелезобетон» и проведены комплексные физико-механические испытания бетона с добавкой (рисунки 5.1, 5.2). Для изготовления бетона использовались материалы, применяемые для серийного производства продукции, изготавливаемой на заводе:

ПЦ ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 31108-2016 завод изготовитель ОАО «Верхнебакинский цементный завод»;

песок по ГОСТ 8736-2014 с  $M_K=1,8$  ООО «Порт Переборы»;

щебень по ГОСТ 8267-93 фракции (5-20) мм – серый гранит месторождение «Большой массив».

и в качестве добавки применялась разработанная комплексная химическая добавка, модифицированная нанодисперсиями гидроксида кремния со следующими характеристиками:

внешний вид – однородная жидкость, светло-коричневого цвета;

плотность,  $г/см^3$  –  $1,038 \pm 0,2$ ;

содержание ионов водорода по показателю pH –  $6,5 \pm 0,5$ ;

содержание сухих веществ, % –  $13,7 \pm 0,2$ ;

В промышленных условиях для подтверждения степени эффективности разработанной добавки изготавливали:

- бетон без добавки (контрольный состав);
- бетон, модифицированный разработанной комплексной химической добавкой.

Для этого изготавливали бетонную смесь БСТ в соответствии с ГОСТ 7473-2010 с маркой по подвижности ПЗ для бетона В30 F<sub>1200</sub> W8

Для проведения опытно-промышленных исследований использовали следующий расход материалов при изготовлении бетонной смеси БСТ В30:

ПЦ –  $380$  кг/м<sup>3</sup>;

П –  $966$  кг/м<sup>3</sup>;

Щ –  $856$  кг/м<sup>3</sup>;

Воду – варьировали в зависимости от влажности инертных материалов для обеспечения требуемой подвижности бетонной смеси ПЗ.

В результате изготовления бетонной смеси, установлено, что подвижность составляла 10-13 см по осадке конуса, что соответствует марке по подвижности ПЗ.

Из приготовленной бетонной смеси изготавливали стойки опор ВЛ длиной 9,5 м, а также для контроля качества бетона изготавливали образцы-кубы размером

100x100x100 мм для оценки прочности на сжатие по ГОСТ 10180-2012 и определения морозостойкости по ГОСТ 10060-2012, образцы-призмы размером 100x100x400 мм для определения прочности на растяжение при изгибе ГОСТ 10180-2012, цилиндры диаметром 150 мм и высотой 150 мм – для определения водонепроницаемости по ГОСТ 12730.5-2018.

Твердение образцов осуществлялось в нормальных условиях (температура  $t=20\pm 2$  °С, влажность  $W\geq 95$  %) и в условиях ТВО при температуре изотермического прогрева 70 °С. Сравнительные результаты испытаний приведены в таблице 5.1

Таблица 5.1 – Физико-механические характеристики бетона контрольного состава и бетона, модифицированного разработанной добавкой

№ П/П	Класс бетона В	Требуемая прочность, МПа	Цемент, кг/м <sup>3</sup>	Комплексная добавка, % от массы цемента (кг)	Вода, л/м <sup>3</sup>	В/Ц	Марка по удобоукладываемости (ОК, см)	Условия твердения	Прочность на сжатие, МПа	Фактический класс В по ГОСТ 18105-2018 (п. 8.4.4)
1	В30	38,4	380	-	192	0,52	ПЗ (13)	Н.У.	38,7	В30
2	В30	38,4	380	1,0 (3,80)	156	0,41	ПЗ (13)	Н.У.	62,6	В50
3	В30	38,4	304	1,0 (3,04)	128	0,42	ПЗ (14)	Н.У.	43,6	В35
4	В30	38,4	380	-	192	0,52	ПЗ (13)	ТВО	38,0	В30
5	В30	38,4	380	1,0 (3,80)	156	0,41	ПЗ (13)	ТВО	60,4	В48
6	В30	38,4	304	1,0 (3,04)	128	0,42	ПЗ (13)	ТВО	42,8	В34

ТВО проводили по следующему режиму:

- 3 ч. – предварительная выдержка БСТ;
- 3 ч. – подъём температуры от 20 °С до 70 °С;
- 6 ч. – изотермический прогрев при  $t=70$  °С;
- 3 ч. – охлаждение.

Установлено, что использование разработанной комплексной добавки эффективно при проведении процессов твердения в нормальных и

тепловлажностных условиях, что подтверждается повышением прочности в проектном возрасте на 59-64 %. Полученные результаты явились основанием для рассмотрения уменьшенного расхода цемента на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси при использовании разработанной комплексной химической добавки. При проведении дальнейших испытаний рассмотрели уменьшение расхода цемента на 20 %. Полученные результаты, представленные в таблице 5.1, подтверждают эффективность разработанной добавки и превышение прочности при уменьшенном расходе цемента относительно контрольного состава.

Для подтверждения полученных результатов проведён выпуск 30 партий бетона, модифицированного комплексной химической добавкой, содержащей нанодисперсии гидроксида кремния, твердение которого осуществлялось в нормальных условиях и произведена статистическая обработка показателей прочности модифицированного бетона в возрасте 28 суток (Приложение А).

Произведенные расчёты показали высокую стабильность полученных результатов, что подтверждается средним коэффициентом вариации прочности, который составил  $\bar{V}=5,6$  %.

Анализ полученных результатов показал, что для изготовления бетонной смеси БСТ В30 ПЗ с разработанной добавкой целесообразно уменьшать расход цемента относительно контрольного состава на 20 % независимо от условий твердения бетона, тепловлажностную обработку с разработанной добавкой целесообразно производить при температуре изотермического прогрева  $\leq 70$  °С.

Результаты по исследованию параметров долговечности бетона представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Параметры прочности и долговечности бетона контрольного состава и бетона, модифицированного разработанной добавкой

№ П/П	Класс бетона В	Цемент, кг/м <sup>3</sup>	Комплексная химическая добавка, мас. % от массы цемента (кг)	Вода, л/м <sup>3</sup>	В/Ц	Марка по удобоукладываемости	Температура тепловлажностной обработки, °С	Прочность в возрасте 28 сут., МПа		Фактический класс В по ГОСТ 18105-2010 (п. 8.4.4)	K <sub>гр</sub> = R <sub>tb</sub> / R	Марка по морозостойкости F <sub>1</sub>	Марка по водонепроницаемости W
								на сжатие	на растяжение при изгибе				
1	В30	380	-	192	0,52	ПЗ	70	38,7	4,49	В30	0,116	200	8
2	В30	380	1,0 (3,80)	156	0,41	ПЗ	70	62,6	8,1	В50	0,130	600	16
3	В30	304	1,0 (3,04)	128	0,42	ПЗ	60	43,6	5,5	В34	0,126	400	12

По результатам проведённых научно-экспериментальных и опытно-промышленных исследований разработан проект технических условий ТУ 29.64.10-XXX-01115840-2022 «Комплексная химическая добавка для бетонов и строительных растворов».

Опытно-промышленные испытания бетона с разработанной добавкой подтверждают хорошую сходимость результатов по показателям качества, полученных при проведении научно-экспериментальных исследований.

Дальнейшие исследования заключались в проведении сравнительных натурных испытаний стоек, изготовленных из контрольного и модифицированного бетона, которые проводились на заводе ООО «Рыбинскэнергожелезобетон» (рисунки 5.1, 5.2)

Результаты испытаний прочности и трещиностойкости имеют хорошую сходимость с результатами теоретических расчётов.



Рисунок 5.1 – Испытания стойки СК26.1-1.1 на заводе  
ООО «Рыбинскэнергожелезобетон»



Рисунок 5.2 – Испытания стойки СВ95-3с на заводе  
ООО «Рыбинскэнергожелезобетон»

На рисунке 5.3 представлены опоры ВЛ нового поколения с использованием высокопрочного модифицированного бетона.



Рисунок 5.3 – Железобетонные опоры ВЛ нового поколения с использованием высокопрочного модифицированного бетона

## 5.2 Выводы по главе

1 Произведён опытно-промышленное изготовление стоек опор ВЛ путём вибрирования и центрифугирования, твердение которых осуществлялось в нормальных условиях и при тепловлажностной обработке.

2 Установлено, что разработанная комплексная химическая добавка может быть рекомендована для бетона нормального и тепловлажностного твердения. Бетон с добавкой, независимо от условий твердения, в проектном возрасте обладает повышенной на 59-65 % прочностью на сжатие, что является основанием для рационального уменьшения расхода цемента в пределах 15 %.

3 Бетон с разработанной добавкой обладает повышенной в 2,5 раза морозостойкостью и повышенной в 2 раза водонепроницаемостью, в целом, характеризуется повышенной долговечностью.

4 Результаты физико-механических испытаний бетона опытно-промышленного и научно-экспериментального исследований обладают хорошей сходимостью по всем исследуемым показателям качества.

5 На основании проведённых комплексных исследований и полученных положительных результатов разработан проект технических условий ТУ 29.65.10-002.XXX-01115840-2022 «Комплексная химическая добавка для бетонов и строительных растворов». Добавка может быть рекомендована к серийному производству и внедрению на заводах по производству железобетонных изделий.



## Заключение

1 Установлено, что уровень основных физико-механических показателей бетона можно повысить использованием разработанной высокоэффективной комплексной химической добавки.

2 Определено, что бетон с разработанной комплексной химической добавкой характеризуется уменьшением величины водопоглощения на 34 % до значения  $W_M=2,7$  %, ростом проектной прочности: на сжатие на 61 %, на растяжение при изгибе на 87 %, на осевое растяжение на 64 %, уменьшением ширины раскрытия трещин до 22 %, повышением несущей способности изгибаемых предварительно напряжённых конструкций до 25 %. Улучшение указанных параметров обеспечивает возможность уменьшения степени армирования в пределах 27 %, и в соответствии с проведёнными технико-экономическими расчётами себестоимость модифицированной стойки СК26.1-1.1 уменьшается на 16 % относительно типовой.

3 Установлено, что модифицированный бетон характеризуется повышенными показателями долговечности: водонепроницаемость  $W \geq 16$ ; морозостойкость  $F_1 \geq 600$ . Модифицированный бетон относится к высокостойким бетонам относительно углекислотной и магниальной коррозии, что подтверждено  $K_{ХС} \geq 0,86$ , и обеспечивает повышенный срок службы железобетонных конструкций ВЛ, который составит не менее 100 лет в большинстве возможных сред эксплуатации в соответствии с СП 28.13330.2017.

4 Произведён выпуск опытно-промышленной партии комплексной химической добавки, которая использована для изготовления 30 партий предварительно напряжённых центрифугированных и вибрированных стоек для опор ВЛ. Результаты опытно-промышленных и научно-экспериментальных исследований обладают хорошей сходимостью, что явилось основанием для разработки проекта ТУ на комплексную химическую добавку.

**Рекомендации.** Разработанную комплексную химическую добавку рекомендуется использовать на заводах по производству железобетонных изделий,

поставляемых на объекты Единой национальной (общероссийской) энергетической сети (ЕНЭС), для повышения трещиностойкости, долговечности и экономичности конструкций.

**Перспективы дальнейшей разработки темы** целесообразно рассматривать в направлении расширения спектра применения комплексной химической добавки, содержащей нанодисперсии гидроксида кремния, например, в дорожных покрытиях и деформационных швах мостовых сооружений, а также изучить возможности модифицирования добавки оксидами d-металлов с целью понижения истираемости и повышения твёрдости бетона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдюков В.И., Кузнецова Т.В. Векишева К.К. Получение расширяющих добавок из отходов углеобогащения алунитов // Цемент. 1982. №8. С. 12- 14.
2. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
3. Ахвердов И.Н. Узловые вопросы теории центробежного формования и уплотнения бетонной смеси. // Тезисы докладов Республиканского научно-технического совещания «Технология безвибрационного формования железобетонных изделий». – Минск, 1979, – С. 3-12.
4. Баженов Ю.М. Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. – М.: АСВ, 2006. – 368 с.
5. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебное пособие для вузов. – М.: АСВ, 2003. – 500 с.
6. Баженов Ю.М., Бабаев Ш.Т., Чумаков Ю.Т. Влияние суперпластификаторов 10-03 и 30-03 на свойства бетонной смеси и бетона с учетом химико-минерального состава цементов // Применение химических добавок в технологии бетона // МД НТП, М.: Знание, 1980, – С. 54-56.
7. Баженов Ю.М., Комар А.Г. Технология бетонных и железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1984. – 674 с.
8. Баженов, Ю.М. Технология бетонов XXI века // Новые научные направления строительного материаловедения: материалы докладов Академических чтений РААСН. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2005. – С. 9-19.
9. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. – М.: Технопроект, 1998. – 768 с.
10. Башлыков И.Ф., Вайнер А.Я., Серых Р.Л., Фаликман В.Р. Комплексные пластифицирующе-ускоряющие добавки на основе суперпластификатора С-3 и промышленных смесей тиосульфата и роданида натрия // Бетон и железобетон, – 2004. – № 6. – С. 13-16.

11. Белов В.В. Модифицированные сухие общестроительные смеси оптимальной гранулометрии. // Вестник Тверского государственного технического университета. – Тверь: Тверской гос. техн. ун-т., 2008. – Вып. 10. С. 13-17.
12. Белов В.В. Оптимизирование композиций для изготовления мелкозернистого бетона. // Вестник центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук: период. науч. издание. – Воронеж – Тверь: РААСН, ТГТУ, 2007. – вып. 6. – С. 27-35.
13. Белов В.В. Прессованный бетон с оптимальными структурой и свойствами. // Вестник Тверского государственного технического университета. – Тверь: ТГТУ, 2007. – Вып. 12. – С. 3-7.
14. Белов В.В., Смирнов М.А. Новые принципы определения состава высококачественного бетона. // Вестник Тверского государственного технического университета. – Тверь: Тверской гос. техн. ун-т., 2008. – Вып. 13. С. 341-346.
15. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. – М.: Издательство литературы по строительству, - 1971. – 208 с.
16. Борисов И.Н., Мандрикова О.С., Семин А.Н. Расширяющаяся добавка на основе сульфатированного и ферритного отхода для получения специальных цементов // Вестник Белгородского государственного университета им. В.Г. Шухова. 2012. №1. С. 125-128.
17. Бут Ю.М., Сычѳв М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. – М.: Высшая школа, 1980. – 472 с.
18. Ванев В.А. Сырьевая база Западной Сибири и пути её рационального использования. – Новосибирск, 1968. – 56 с.
19. Ваучский М.Н. Нанотехнологии в пластификации бетонных смесей // Вестник строительного комплекса. – 2008. – № 56.
20. Веригин, Ю.А. Многократная обработка вяжущих в активаторах-смесителях непрерывного действия / Ю.А. Веригин, В.В. Соколов // Строительные материалы. – 1971. – № 1. – С. 18.

21. Власов В.К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками // Бетон и железобетон. -1993. -№4. -С.10-12.
22. Вовк А. И. Гидратация трехкальциевого алюмината  $C_3A$  и смесей  $C_3A$ –гипс в присутствии ПАВ: адсорбция или поверхностное фазообразование // Колл. журнал. – 2000. т. 62. – № 1. – С. 31–38.
23. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества: учебник для вузов / 4-е изд., перераб. и доп. – М: Стрйиздат, 1986. – 464 с.
24. Волженский А.В., Попов Л.Н. Смешанные цементы повторного помола и бетоны на их основе. – М.: Госстройиздат, 1961. – 107 с.
25. Волков, Ю.С. Применение сверхпрочных бетонов в строительстве. Зарубежный опыт / Ю.С. Волков // Бетон и железобетон. – 1994. – №3. – С. 27-31.
26. Высокопрочный бетон на основе элементов нанотехнологии по методу золь-гель / Комохов П.Г., Сватовская Л.Б., Соловьева В.Я., Сычева А.М. // Десятые академические чтения РААСН, 2006.
27. Гамалий Е.А. Комплексные модификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов и активных минеральных добавок для тяжелого конструкционного бетона: автореферат. – Челябинск: ЮУрГУ, 2009. – 22 с.
28. Генералов М. Б. Криохимическая нанотехнология: учеб. пособие для вузов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. – 325 с.
29. Гидравлические вяжущие вещества. Кузнецова И.Н., Ращупкина М.А., Косач А.Ф., Гутарева Н.А. – Омск, – 2012. – 74 с.
30. Гидратация  $C_3A$  и некоторые свойства мономинерального камня с суперпластификатором С-3./ Фаликман В.Р., Вовк А.И., Вовк Г.А., и др. – Сб. трудов НИИЖБ. – 1988. – С. 43-51.
31. Горчаков Г.И., Орендлихер Л.П., Савин В.И. и др. Состав, структура и свойства цементных бетонов. / Под редакцией Горчакова Г.И. – М.: Стройиздат, – 1976. – 144 с.
32. Горшков В.С., Тимашев В.В, Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1981. – 333 с.

33. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и растворов. Общие технические условия.
34. ГОСТ 30459-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности.
35. Гридчина А.А., Титова Л.А. Перспективы применения бетонов на основе расширяющих добавок в современном монолитном строительстве // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2014. № 21. С. 17–19.
36. Грушко И.М., Алтухов В.Д. Вопросы теории структуры, прочности и разрушения бетонов // Технологическая механика бетона. Рига, 1986. – С. 15-29.
37. Грушко И.М., Ильин А.Г., Рашевский С.Т. Прочность бетона на растяжение. – Харьков: изд-во ХДУ, 1973. – 156 с.
38. Грызлов В.С. Меньшикова Е.В. Элементы термодинамики бетона. ГОУ ВПО ГТУ, 2005. – 169 с.
39. Гусев А.И., Ремпель А. А. Нанокристаллические материалы. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
40. Данюшевский В.С. Проектирование оптимальных составов тампонажных цементов. – М.: Недра, 1978. – 293 с.
41. Залесов А.С., Климов Ю.А. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил.
42. Злобин И.А., Мандрикова О.С., Борисов И.Н. Способы механического воздействия при помоле как фактор, определяющий формирования качественных характеристик цемента // Цемент и его применение. 2016. №1. С. 158-162.
43. Изотов В.С., Соколова Ю.А. Химические добавки для модификации бетона. – М.: Палеотип, 2006. – 244 с.
44. Калоузек Г.Л. Применение дифференциального термического анализа при изучении системы CaO - SiO<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O / 3-й Международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1958. С.206-219.
45. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Батраков В.Г. Комплексный модификатор бетона марки МБ-01// Бетон и железобетон. – 1997. – №5. – С. 38- 41.

46. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны. – М.: ООО «Предприятие Мастер Бетон», 2010. – 258 с.
47. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кривобородов Ю.Р. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезёма и суперпластификатора на свойства бетона // Бетон и железобетон. – 1992. – № 7. – С. 4-5.
48. Карибаев К.К. Поверхностно-активные вещества в производстве вяжущих материалов. - Алма-Ата: Наука, 1980. – 336 с.
49. Касторных Л.И. Добавки в бетоны и строительные растворы. – 2-е изд. – Ростов-на-Дону.: Феникс, 2007. – 221 с.
50. Козлов В.В. Сухие строительные смеси. - М.: АСВ, 200 - 96 с.
51. Козлова, В. К. Продукты гидратации кальциево-силикатных фаз цемента и смешанных вяжущих веществ: монография / В. К. Козлова, Ю. В. Карпова, Ю. А. Ильевский. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2005. – 183 с.
52. Колбасов В.М. Структурообразующая роль суперпластификаторов в цементном камне бетонов и растворов // Бетоны с эффективными модифицирующими добавками. – М.: НИИЖБ, 1985. – с. 126-134.
53. Комохов П.Г. Применение нанотехнологий в производстве бетонов /Сб. тезис «Популярное бетоноведение». - 22 марта 2007. - С. 7-8. СПб.: 42 с. (г. Зеленогорск, Лен. обл. - I Межд. «Популярное бетоноведение». С.53.
54. Комохов П.Г., Попов В.П. Энергетические и кинетические аспекты механики разрушения бетона. Самара, 1999. – 109 с.
55. Коротких Д.Н. Дисперсное армирование структуры бетона при многоуровневом трещинообразовании // Строительные материалы. – 2011. – № 3. – С. 96–99.
56. Косухин М.М., Лещёв С.И. и др. Вибропрессованные бетоны с суперпластификаторами на основе резорцинформальдегидных олигомеров // Строительные материалы, – 2006. – № 10. – С. 32-33.

57. Крамар Л.Я. Оптимизация структуры и свойств цементного камня и бетона введением тонкодисперсной добавки аморфного кремнезёма: автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1989. – 17 с.
58. Красильников К.Г., Никитина Л.В., Лапшина А.И. Расширяющийся портландцемент с добавкой СаО. / Физико-химические исследования цементного камня и бетона. НИИЖБ. М., 1972. вып. 7. С. 4-30.
59. Красный И.М. О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителей //Бетон и железобетон. -1987. -№5. -С.10-11.
60. Крыхтин Г.С., Жарко В.И. Скорость гидратации и дисперсность цементов / Труды 6 Международного конгресса по химии цемента. М.: Стройиздат, 1974. 12 с.
61. Кузнецова Т.В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы. – М.: Стройиздат, 1986. – 208 с.
62. Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов. – М.: Высшая школа, 1989. – 384 с.
63. Курбатова И.И. Химия гидратации портландцемента. М.: Стройиздат, 1977. 154 с.
64. Ли Ф.М. Химия цемента и бетона / Перевод с англ.: под ред. С.М. Рояка. – М.: Гос. изд. литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. – 646 с.
65. Малинин Ю.С., Ватутина Л.С., Юдович Б.Э. Комплексные соли в процессах предгидратации цемента / Исследование процессов гидратации и твердения специальных цементов. – М.: НИИЦемент, 1980. – С. 71-79.
66. Михайлов В.В., Литвер С.Л. Расширяющий и напрягающий цемент. Самонапряженные железобетонные конструкции. М.: Стройиздат, 1974. – 285 с.
67. Модификаторы цементных бетонов и растворов (Технические характеристики и механизм действия): уч. пособие / Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Гамалий Е.А. и др. – Челябинск: ООО «Искра Профи», 2012. – 202 с.
68. Невилль А.М. Свойства бетонов. – М.: Стройиздат, 1972. – 344 с.



69. Полак А.Ф., Бабков В.В. Влияние дисперсности цемента на прочность его гидрата // Цемент. 1980. № 9. С. 15-17.
70. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Староверов В.Д. Эффективность активации воды затворения углеродными наночастицами. // Инженерно-строительный журнал. 2009. - №1. – С. 40-45.
71. Рамачандран В.С., Фельдман Р.Ф. Каллепарди М. и др. Добавки в бетон: Справочное пособие; под ред. В.С. Рамачандрана / Перевод Т.А. Розенберг, А.С. Болдырев, В.Б. Ратинова. – М.: Стройиздат, 1988. – 575 с.
72. Рамачандран и др. Добавки в бетон: Справ. пособие /В.С.Рамачандран, Р.Ф.Фельдман, М.Коллепарди и др.; Под ред. В.С.Рамачандрана. -М.: Стройиздат, 1988. -С.168-184.
73. Ратинов В.Б., Иванов Ф.М. Химия в строительстве. М.: Стройиздат, 1977. – 202 с.
74. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. – М.: Стройиздат, 1989. – 186 с.
75. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика как новая область знания // Вестник АН СССР, 1961. – № 10. – С.32-42.
76. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твёрдых тел. – М.: Наука, 1974. – 156 с.
77. Рекомендации по технологии изготовления и конструкций из высокопрочных бетонов. М.: Госстрой СССР, 1987. – 53 с.
78. Родионов Р.Б. Инновационный потенциал нанотехнологий в производстве строительных материалов. // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2006. – № 8 (91). – С. 72-76.
79. Романенко Е.Ю. Автореферат на соискание учёной степени кандидата технических наук. Высокопрочные бетоны с минеральными пористыми и волокнистыми добавками для изготовления длинномерных центрифугированных конструкций. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 1990. – 28 с.
80. Рояк С.М., Рояк Г.С. Специальные цементы. 2-е издание переработанное и дополненное. – М.: Стройиздат, 1983. – 279 с.

81. Садрашева А.О. Гидросидикаты кальция (C-S-H) как основная фаза твердения // Ползуновский альманах . – 2016. – № 3. – С. 193-196.
82. Сватовская Л.Б., Шангин В.Ю., Шангина И.И. и др. Особенности получения и свойства композиционных неорганических покрытий на цементной основе. - С-Пб, ПГУПС, 2005. – 98 с.
83. Структурообразование и разрушение цементных бетонов. / Бабков В.В., Мохов В.Н., Капитонов С.М., Комохов П.Г. – Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. – 376 с.
84. Тимашев В.В. Влияние физической структуры цемента на его прочность // Цемент. – 1978. – № 2. – С. 6-8.
85. Улучшение качества и эффективности благодаря применению ускорителя твердения. // СРІ Международное бетонное производство. – 2011. – № 1. – С. 88–90.
86. Ушеров-Маршак А.В. Добавки нового поколения. Химические и минеральные добавки в бетон: учебник. – Харьков: Колорит, 2005. – 251 с.
87. Ушеров-Маршак А.В. Химические и минеральные добавки в бетон. – Харьков, 2005. – 250 с.
88. Фаликман В.Р. Поликарбоксилаты, гиперпластификаторы: вчера, сегодня, завтра // Популярное бетоноведение. – 2009 – №2(28) – С. 86-90.
89. Фаликман В.Р., Вайнер А.Я., Башлыков Н.Ф. Новое поколение суперпластификаторов // Бетон и железобетон. - 2000 - №5 – С. 6-7.
90. Физико-химические основы процессов твердения инновационного бетона для дорожных покрытий / В.Я. Соловьёва, Л.Л. Масленникова, М. Абу-Хасан и др. // Естественные и технические науки. – 2017. – №2 (104). – С.150-155.
91. Харитонов А.М. Принципы формирования структуры композиционных материалов повышенной трещиностойкости/ А.М. Харитонов, д.т.н., СПб.ГАСУ//Технологии Бетонов №3-4, 2011.С. 24-26.
92. Хилажев Д.Р. Исследование влияния активных минеральных добавок и поверхностно-активных веществ на особенности формирования структуры

мелкозернистого бетона. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». Том 3. – 2013 – №1. – С.38-40.

93. Химия и технология специальных цементов / Под ред. И.В. Кравченко. М.: Стройиздат, 1979. – 207 с.

94. Хозин В.Г Модификация цементных бетонов малыми легирующими добавками // Строительные материалы, – 2006. – № 10. – С. 30-31.

95. Холмянский М.М. Бетон и железобетон: Деформативность и прочность. – М.: Стройиздат, 1997. – 576 с.

96. Чистов Ю.Д. Наномодификаторы в неавтоклавном ячеистом бетоне/Ю.Д. Чистов, д.т.н., проф., МГСУ, М.В. Краснов, магистр техники и технологии//Технологии бетонов №7-8, 2010. – С. 68-70.

97. Шейкин А.Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня. – М.: Стройиздат, 1974. – 191 с.

98. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.

99. Шестопёров С.В. Долговечность бетона. – Москва.: Автотрансиздат, 1960. – 512 с.

100. Шестопёров С.В. контроль качеств бетона. – М.: Высшая школа, 1981. – 244 с.

101. Шестоперов С.В., Рояк С.М., Иванов Ф.М. Мокрый помол цемента / Труды ВНИИЦемент, 1952. – 23 с.

102. Юхневич П.И. О взаимосвязи характеристик молекулярной структуры химических добавок-пластификаторов с их эффективностью в цементных композициях // Наука и техника, – 2012. – № 1. – С. 48-51.

103. Юхневич П.И., Зеленовский В.М., Солдатов В.С. Об определяющей роли функциональных групп и вида связей в структуре молекулы химической добавки-пластификатора // Теория и исследования. – 2011. – № 4. – С. 25 – 27.

104. Юхневский П.И. Влияние химической природы добавок на свойства бетонов. – Минск: БНТУ, 2013. – 310 с.

105. Calcium-aluminum-silicate-hydrate cement phases and rare Ca-zeolite association at Colle Fabbri, Central Italy / F. Stoppa, F. Scordari, E. Mesto, V. V. Sharygin, G. Bortolozzi // *Central Europe-an Journal of Geosciences*. – 2010. – № 2(2). – C. 175-187.
106. DIN 1045-2 Norm, 2001-07. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton-Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Beuth Verlag, Berlin.
107. Jennings H.M. Refinements to colloid model of C-S-H in cement: CM-II // *Cem. Concr. Res.* – 2008. – №. 38. – C. 275–289.
108. Kucharska L. Tradycyjne i współczesne domieszki do Betonu zmieszane z wodą zarobową // *Cement, Wapno, Beton*. – 2000. – № 2. – C. 46-61.
109. Nonat A. The structure and stoichiometry of C-S-H // *Cem. Concr. Res.* – 2004. – №. 34. – C. 1521-1528.
110. Plank I. Neues für Wechselwirkung zwischen Zementen und Polycarboxilat-Fleismitteln. I. Plank K, G. Bassioni, Z. Dai, H. Keller, B. Sachsehauser, N. Zonaoui. *Proceedings der 16 Internationalen Baustofftagung*. – Weimar. – 2006. – Band 1. – Seite 579-598.
111. P.-C. Aitchin and A. Nevill. High-Performance Concrete Demystified. *Concrete International*. – 1993 – Jan, Vol.15, №1. C. 21-26.
112. P.-C. Aitchin. *High Performance Concrete*. E&FN Spon. – 2004. – 140 c.
113. Richardson I. G. The calcium silicate hydrates / I. G. Richardson // *Cement and Concrete Research*. – 2008. – № 38. – C. 137–158.
114. S.W. Forster. High-Performance Concrete – Stretching the Paradigm. // *Concrete International*. – 1994 – Oct, Vol.16, №10. C. 33-34.
115. Simone, Sanna. Formation of hydroxyl groups at Calcium-Silicate-Hydrate (C-S-H) : coexistence of Ca-OH and Si-OH on wollastonite (001) / Simone Sanna, G.S. Wolf, P. Thissen // *The journal of physical chemistry*. – 2014. – № .118. – C. 8007-8013.
116. Spiratos N., Jolicoeur C. Chemical admixtures for the 21 century. VI CANMENT / *ACI Int. Conf. on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in concrete*. ACI SP 195 – 1, 2000.

117. Taylor H.F.W. Proposed structure for calcium silicate hydrate gel. // J. Amer. Ceram. Soc.. – 1986. Vol. 70. – № 7. – C. 481-485.

**ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ  
ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:**

**публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1 Механизм защитного действия ремонтных составов на цементной основе в дорожных покрытиях [Текст] / В.Я. Соловьёва, Л.Л. Масленникова, Н.В. Ёршиков, А.В. Касаткина, Д.В. Соловьёв, А.А. Кабанов, **С.П. Касаткин** // Транспортное строительство. – 2016. – №10. – С.13-15.

2 Высокоэффективный наномодифицированный бетон повышенной прочности и долговечности [Текст] / **С.П. Касаткин**, В.Я. Соловьёва, И.В. Степанова, Д.В. Кузнецов, Д.А. Сеницын // Нанотехнологии в строительстве. – 2022. - № 14 (6). – С.493-500.

3 Исследования железобетонных центрифугированных стоек опор ЛЭП с арматурой класса А<sub>у</sub>1000П [Текст] / Тихонов Г.И., Блажко В.П., Тихонов И.Н., Качановская Л.И., Касаткин С.П. // Вестник НИЦ «Строительство». – 2023. – №1 (36). – С.99-117.

**патенты:**

4 Высокопрочный бетон [Текст]: пат. 2515665 Рос. Федерация: МПК С04В 28/04, С04В 111/20 / Сватовская Л.Б., Соловьёва В.Я., Чернаков В.А., Степанова И.В., **Касаткин С.П.**; ФГБОУ ВПО ПГУПС. - № 2012126923/03; 27.06.2012; опубл. 20.05.2014 Бюл. № 14.

5 Высокопрочный бетон [Текст]: пат. 2505500 Рос. Федерация: МПК С04В 28/04, С04В 111/20, / Сватовская Л.Б., Соловьёва В.Я., Ёршиков Н.В., Степанова И.В., **Касаткин С.П.**; ФГБОУ ВПО ПГУПС - № 2012132785/03; 31.07.2012; опубл. 27.01.2014 Бюл. № 3.

6 Высокопрочный бетон [Текст]: пат. 2592318 Рос. Федерация: МПК С04В 28/04, С04В 22/00, С04В 24/24, С04В 103/65 / Сватовская Л.Б., Соловьёва В.Я., Степанова И.В., Сурков В.Н., Иванова В.Е., **Касаткин С.П.**; ФГБОУ ВПО ПГУПС Имп. Александра I. - № 2015120343/03; 28.05.2015; опубл. 20.07.2016 Бюл. № 20.

7 Высокопрочный бетон [Текст]: пат. 2593402 Рос. Федерация: МПК С04В 28/04, С04В 22/00, С04В 24/24, С04В 103/65 / Сватовская Л.Б., Соловьёва В.Я., Степанова И.В., Сурков В.Н., Иванова В.Е., **Касаткин С.П.**; ФГБОУ ВПО ПГУПС Имп. Александра I. - № 2015120386/03; 28.05.2015; опубл. 10.08.2016 Бюл. № 22.

8 Высокопрочный бетон [Текст]: пат. 2705114 Рос. Федерация: МПК С04В 28/04, С04В 28/00, С04В 24/26, С04В 22/08, С04В 111/20 / Зыков В.В., Соловьёва В.Я., Иванова В.Е., Соловьёв Д.В., **Касаткин С.П.**, Зыков Я.В.; Зыков В.В. - № 2019102648; 30.01.2019; опубл. 05.11.2019 Бюл. № 31.

#### публикации в других изданиях:

9 Химическая активация для цементсодержащих композиций улучшенного качества [Текст] / И.В. Степанова, Н.В. Ёршиков, Т.И. Бойкова, **С.П. Касаткин** и др. // Новые исследования в материаловедении и экологии: сборник научных трудов / ред.: Л.Б. Сватовская, Л.Л. Масленникова, М.В. Шершнёва. – Санкт-Петербург: ПГУПС, 2012. – Вып. № 12. – С.36-39.

10 Разработка высокопрочного бетона [Текст] / В.Я. Соловьёва, **С.П. Касаткин**, И.В. Степанова и др. // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии. Материалы II Международной научно-практической конф. ПГУПС Императора Александра I, каф. «Инженерная химия и естествознание». – Санкт – Петербург 2015. С.23-26.

11 Геоэкозащитные бетонные дорожные покрытия [Текст] / В.Я. Соловьёва, Т.И. Бойкова, **С.П. Касаткин** и др. // Геоэкохимия литосферы. Материалы II Международной научно-практической интернет-конф. ПГУПС Императора Александра I. – Санкт-Петербург 2016. С.30-32.

12 Восстановление и защита строительных конструкций, как сохранение природно-техногенной среды [Текст] / В.Я. Соловьёва, А.В. Касаткина, **С.П. Касаткин** и др. // Геоэкохимия защиты литосферы. Материалы II Международной научно-практической интернет-конф.. ПГУПС Императора Александра I. – Санкт-Петербург 2016. С.33-36.

13 Гидроизоляционно-защитное покрытие повышенной коррозионной стойкости [Текст] / В.Я. Соловьёва, Т.И. Бойкова, **С.П. Касаткин** и др. //

Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии. Материалы III Международной научно-практической конф. ПГУПС Императора Александра I, каф. «Инженерная химия и естествознание». – Санкт-Петербург 2016. С.49-50.

14 Инновационный высокопрочный бетон для высоковольтных линий [Текст] / В.Я. Соловьёва, М.С. Абу-Хасан, **С.П. Касаткин** и др. // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии. Материалы IV Международной научно-практической интернет-конф. ПГУПС Императора Александра I, каф. «Инженерная химия и естествознание». – Санкт-Петербург 2017. С.21-25.

15 Центрифугированные стойки нового поколения на цементной основе для линий электропередач [Текст] / **С.П. Касаткин** // Естественные и технические науки. – 2017. – №2 (104). – С.138-142.

16 Бетон для фундаментов опор линий электропередачи повышенной коррозионной стойкости и долговечности [Текст] / В.Я. Соловьёва, **С.П. Касаткин**, И.В. Степанова, Л.Л. Масленникова, М. Абу-Хасан, Н.В. Ёршиков // Естественные и технические науки. – 2017. – №2 (104). – С.146-149.

17 Физико-химические основы процессов твердения инновационного бетона для дорожных покрытий [Текст] / В.Я. Соловьёва, Л.Л. Масленникова, М. Абу-Хасан, И.В. Степанова, Н.В. Ёршиков, Т.И. Бойкова, В.В. Макаров, **С.П. Касаткин** // Естественные и технические науки. – 2017. – №2 (104). – С.150-155.

18 Термодинамические основы создания бетона повышенной прочности и твердения для дорожных покрытий [Текст] / В.Я. Соловьёва, Л.Л. Масленникова, М. Абу-Хасан, И.В. Степанова, Т.В. Смирнова, Т.И. Бойкова, В.В. Макаров, **С.П. Касаткин** // Естественные и технические науки. – 2017. – №2 (104). – С.156-162.

19 Долговечные железобетонные опоры из наномодифицированного бетона — будущее цифровых распределительных сетей [Текст] / В.Я. Соловьёва, П.И. Романов, Л.И. Качановская, С.П. Касаткин, Т.И. Сбойчакова // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – №10. – С.60-62.



**Приложение А. Статистическая обработка показателей прочности бетона  
опытно-промышленного изготовления, модифицированного разработанной  
добавкой**

№ партии	Прочность при сжатии в единичных образцах партии $R_i$ , МПа			Прочность бетона в партии $R_m$ , МПа	Среднеквадратичное отклонение прочности бетона в партии $S_m$ , МПа	Коэффициент вариации прочности бетона в партии $V_m$ , %
1	45,9	43,7	43,3	44,3	1,42	3,20
2	46,5	44,1	44,0	44,9	1,41	3,14
3	46,5	46,7	39,4	44,2	4,19	9,48
4	46,5	47,5	39,2	44,4	4,50	10,14
5	43,3	44,7	39,5	42,5	2,72	6,40
6	42,6	43,7	40,8	42,4	1,43	3,38
7	43,7	45,0	42,2	43,7	1,38	3,17
8	42,6	44,9	42,8	43,4	1,26	2,91
9	39,5	42,8	41,3	41,2	1,65	4,00
10	38,0	41,0	47,3	42,1	4,76	11,29
11	47,3	42,8	42,3	44,1	2,78	6,29
12	43,2	42,7	39,6	41,9	1,94	4,63
13	38,9	44,3	39,5	40,9	2,95	7,21
14	41,4	46,7	38,7	42,3	4,08	9,64
15	41,3	38,6	46,6	42,2	4,05	9,61
16	42,3	43,9	43,9	43,4	0,95	2,18
17	44,4	44,5	40,9	43,3	2,04	4,72
18	45,0	41,3	45,8	44,0	2,38	5,41
19	42,3	44,8	45,1	44,1	1,55	3,52
20	38,9	39,8	43,3	40,6	2,30	5,65
21	46,2	44,9	41,9	44,4	2,20	4,96
22	42,7	40,3	44,8	42,6	2,26	5,31
23	42,0	43,7	47,0	44,2	2,55	5,76
24	44,3	44,0	39,1	42,5	2,88	6,78
25	47,1	45,7	39,8	44,2	3,88	8,78
26	38,4	39,4	40,0	39,3	0,83	2,11
27	41,3	43,6	44,4	43,1	1,59	3,69
28	45,5	43,3	41,2	43,3	2,11	4,88
29	40,8	47,6	40,2	42,9	4,13	9,63
30	39,8	40,2	39,6	39,9	0,28	0,71
Среднее значение коэффициента вариации прочности бетона						5,62

## Приложение Б. Акт о проведении опытно-промышленных исследований бетона, модифицированного комплексной химической добавкой



А.А. Полетаев  
«05» июня 2023 г.

### АКТ

о проведении опытно-промышленных исследований бетона, модифицированного комплексной химической добавкой, содержащей нанодисперсии гидроксида кремния, и предварительно напряжённых стоек марки СВ95-3с.

Мы, нижеподписавшиеся,

от ФГБОУ ВО ПГУПС Императора Александра I:

- научный руководитель д.т.н., профессор Соловьёва Валентина Яковлевна,
- аспирант Касаткин Сергей Петрович,

от ООО «Рыбинскэнергожелезобетон»:

- генеральный директор Полетаев Александр Александрович,
- главный технолог Рогачёв Михаил Евгеньевич

составили настоящий акт о нижеследующем.

По согласованию сторон, на основании результатов научных исследований, проведённых в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I, при выполнении диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата технических наук на тему «Высокоэффективный бетон, модифицированный комплексной химической добавкой, содержащей нанодисперсии гидроксида кремния» были проведены опытно-промышленные исследования 30 партий бетона В30, модифицированного комплексной химической добавкой, содержащей нанодисперсии гидроксида кремния, а также изготовление и испытание стоек СВ95-3с с использованием модифицированного бетона.

Настоящим подтверждаем, что представленная комплексная химическая добавка эффективна, повышает класс прочности бетона, что позволят сократить расход цемента. Параметры прочности и долговечности бетона контрольного состава и бетона, модифицированного комплексной химической добавкой представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Параметры прочности и долговечности бетона контрольного состава и бетона, модифицированного комплексной химической добавкой.

№ п/п	Проектный класс бетона В	Цемент, кг/м <sup>3</sup>	Комплексная химическая добавка, % от массы цемента (кг)	Вода, л/м <sup>3</sup>	В/Ц	Марка по удобоукладываемости	Температура тепловлажностной обработки, °С	Прочность в возрасте 28 сут., МПа			Фактический класс В по ГОСТ 18105-2010 (п. 8.4.4)	K <sub>гр</sub> = R <sub>сб</sub> / R	Марка по морозостойкости F <sub>т</sub>	Марка по водонепроницаемости W
								на сжатие	на растяжение	при изгибе				
1	V30	380	-	192	0,52	ПЗ	80	38,7	4,5	V30	0,116	200	8	
2	V30	380	1,0 (3,80)	156	0,41	ПЗ	80	62,6	7,9	V50	0,130	600	16	
3	V30	304	1,0 (3,04)	128	0,42	ПЗ	60	42,8	5,6	V34	0,131	400	12	

Генеральный директор  
ООО «Рыбинскэнергожелезобетон»

Главный технолог  
ООО «Рыбинскэнергожелезобетон»

Научный руководитель д.т.н., профессор

Аспирант

Полетаев А.А.

Рогачёв М.Е.

Соловьёва В.Я.

Касаткин С.П.

**Приложение В. Технические условия (проект) на комплексную химическую добавку**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I  
(ФГБОУ ВО ПГУПС)

ОКПД 29.64.10

Группа Ж10

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор по  
научной работе, д.т.н. профессор

 Т.С. Титова

«17» \_\_\_\_\_ 2022 г.



**КОМПЛЕКСНАЯ ХИМИЧЕСКАЯ ДОБАВКА ДЛЯ  
БЕТОНОВ И СТРОИТЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ**  
**ТУ 29.65.10-002-XXX-01115840-2022**  
(проект)

Введены впервые

Дата введения

«17» ноября 2022 г.

РАЗРАБОТАНО:

аспирант каф.

«Инженерная химия и естествознание»

 С.П. Касаткин

Заведующий испытательной  
лабораторией АНИТЦ «Сократ» каф.  
«Инженерная химия и естествознание»

 И.В. Степанова

Санкт-Петербург  
2022

Име. № подл.	Подп. и дата
Име. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Име. инв. №	Подп. и дата





№ п/п	Наименование показателей	Добавка «Комплексная химическая добавка для бетонов и строительных растворов»	Методы испытаний
1	Внешний вид	Однородная жидкость светло-коричневого цвета с тонкой пленкой белого цвета на поверхности	п. 4.2.
2	Показатель активности водородных ионов, рН	6,0±0,5	п. 4.3.
3	Плотность, г/см <sup>3</sup> , не менее	1,038±0,003	п.4.4. и ГОСТ 18329 п.4.6.
4	Массовая доля сухих веществ в жидкости, мас. %, не менее	13,	п.4.5

1.3 В соответствии с классификацией, установленной ГОСТ 24211-2008, добавка является суперпластифицирующей:

- суперпластифицирующей, уменьшение количества воды затворения более чем на 20 %;
- замедляющей схватывание (обеспечивающей живучесть бетонной смеси в течение  $\geq 1$  часа 30 мин.);
- повышающей прочность бетонов и растворов в проектном возрасте более чем на 20 %;
- повышающей морозостойкость на 2 марки и более;
- понижающей проницаемость – повышение водонепроницаемости на 2 марки и более;
- повышающей коррозионную стойкость бетона относительно различных агрессивных сред.

Добавка должна соответствовать требованиям ГОСТ 24211-2008 и настоящих технических условий.

1.4 Основные эффекты действия добавки, оцениваемые по критериям эффективности, определяют по ГОСТ 30459-96 при оптимальной дозировке добавки.

1.5 Добавка считается пригодной к применению в качестве суперпластифицирующей, суперводоредуцирующей, замедляющей схватывание, повышающей прочность, коррозионную стойкость, морозостойкость и

Инь. №подл.	Подп. и дата
Инь. №дубл.	Взам. инв. №
Инь. №дубл.	Подп. и дата
Инь. №подл.	Подп. и дата

Лл	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	ТУ 26.64.10-XXX-01115840-2022	Лист
						3



водонепроницаемость если она удовлетворяет требованиям по эффективности, представленным в таблице 2 - для бетонов и в таблице 3 – для растворов.

Таблица 2

№ п/п	Наименование показателей	Добавка «Комплексная химическая добавка для бетонов и строительных растворов»	Методы испытаний
1	Оптимальная дозировка, % от массы цемента (уточняется при проведении подборов по ГОСТ 27006-86)	1,0±0,2	ГОСТ 30459 п.3.9
2	Удобоукладываемость	увеличение подвижности б/смеси от П1 до П4	ГОСТ 10181.1
3	Воздуховлечение, %	2 - 6	ГОСТ 10181.3.
4	Сохраняемость подвижности бетонной смеси	≥ 2 часа 30 мин	ГОСТ 30459
5	Повышение прочности на сжатие, на растяжение при изгибе: а) при твердении в нормальных условиях: - 3 сут., не менее - 7 сут., не менее - 28 сут., не менее б) при тепловой обработке: - 28 сут., не менее	45/55 30/42 26/38  24/33	ГОСТ 10180 п.5.1.
6	Повышение морозостойкости, цикл, не менее	75 %	ГОСТ 10060.2 п.6
7	Повышение водонепроницаемости, атм. не менее	75 %	ГОСТ 12730.5 п.2
8	Повышение коррозионной стойкости бетона, не менее чем	в 2 раза	ГОСТ 30459 п.9.6.

1.6 Добавка может быть использована для армированных и неармированных бетонов и растворов строительных.

1.7 Составы бетонов разной плотности и растворов строительных с добавкой проектируют по ГОСТ 27006-86.

1.8 Бетоны с добавкой должны соответствовать требованиям ГОСТ 26633 - 2015, растворы ГОСТ 28013-98.

1.9 Материалы, применяемые для бетонов и растворов, приготовляемых с добавкой, должны соответствовать требованиям стандартов или техническим условиям на эти материалы.

1.10 Требования к сырью и материалам.

Ине. №докл.	Подп. и дата
Ине. №дубл.	Взам. инв. №
Ине. №докл.	Подп. и дата
Ине. №докл.	Подп. и дата

Лп	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

ТУ 26.64.10-XXX-01115840-2022

Лист

4



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 и ГОСТ 12.4.103.

2.7 Растворы на основе добавки не представляют опасности при эксплуатации по ГОСТ ГН 2.2.5.1313, 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, ГОСТ 2.3.02.

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.

### 3 Правила приёмки

3.1 Добавка должна быть принята техническим контролем изготовителя и техническим контролем потребителя. Производится контроль каждой партии добавки.

Объем партии у изготовителя – одна емкость, но не более 10 м<sup>3</sup>; у потребителя – одна поставка.

3.2 У изготовителя контролируется: внешний вид, плотность и рН каждой партии добавки, у потребителя – внешний вид, плотность и рН каждой партии добавки, а также эффект повышения прочности бетона или раствора при поступлении каждой партии добавки.

Инв. №подл	Подп. и дата						Лист 6
	Взам. инв. №						
	Инв. №дубл.						
	Подп. и дата						
	Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	ТУ 26.64.10-XXX-01115840-2022	









## Приложение А.

Список нормативных документов, на которые даны ссылки в настоящих 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 12.1.007 – 76	ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности»
ГОСТ 12.4.001 – 80	ССБТ. Очки защитные. Термины и определения.
ГОСТ 12.4.103 – 83	«ССБТ. Одежда специальная защитная, средства индивидуальной защиты ног и рук. Классификация»
ГОСТ 17.23.02-2014	«Охрана природы. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями»
ГОСТ 1770-74	«Посуда мерная лабораторная стеклянная»
ГОСТ 4145-74	Реактивы. Калий сернокислый. Технические условия.
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 10181.1 - 2014	«Смеси бетонные. Методы определения удобоукладываемости»
ГОСТ 10181.3 - 2014	«Смеси бетонные. Методы определения пористости»
ГОСТ 10181.4 - 2014	«Смеси бетонные. Методы определения расслаиваемости»
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 12730.5-84	«Бетоны. Методы определения водонепроницаемости»
ГОСТ 18329-2014	«Смолы и пластификаторы жидкие. Методы определения плотности»
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»

Подп. и дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Подп. и дата
Инв. № подл.

Лп	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

ТУ 26.64.10-XXX-01115840-2022

Лист

11



ГОСТ 24211 – 91	«Добавки для бетонов. Общие технические требования»
ГОСТ 25336 – 82	«Посуда и оборудование лабораторные стеклянные. Типы, основные параметры и размеры»
ГОСТ 26633 – 2015	Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия»
ГОСТ 27006 – 86	«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 и строительных растворов. Определение и оценка эффективности».

Инв. №подл						Подп. и дата
Инв. №дубл.						Взам. инв. №
Подп. и дата						Инв. №докум.
ТУ 26.64.10-XXX-01115840-2022						Лист
						12
Лп	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата		

