

Министерство образования и науки Луганской Народной Республики
Государственное образовательное учреждение высшего образования
Луганской Народной Республики
"Луганский государственный университет имени Владимира Даля"

На правах рукописи

Коваленко Денис Сергеевич

УДК 666.972.1/.3 (043.3)

**ТЯЖЕЛЫЕ ЦЕМЕНТНЫЕ БЕТОНЫ
С ПОНИЖЕННОЙ УСАДКОЙ ИЗ ПОДВИЖНЫХ СМЕСЕЙ**

05.23.05 – строительные материалы и изделия

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
Сороканич Станислав Васильевич

Идентичность всех экземпляров
диссертации заверяю:
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.006.02



Лахтарина С. В.

Луганск – 2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 РАЗДЕЛ 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ УСАДКЕ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНА.....	11
1.1 Усадка цементного камня и бетона как фактор долговечности бетонных конструкций.....	11
1.2 Классификация видов усадки бетона и современные представления о её механизме.....	12
1.3 Закономерности влияния компонентов бетона на усадку и возможности её регулирования.....	18
1.4 Существующие способы снижения усадки.....	21
1.5 Теоретическое обоснование комплексных добавок, снижающих усадку бетона. Научная гипотеза исследования.....	31
Выводы по разделу 1.....	37
2 РАЗДЕЛ 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	38
2.1 Характеристика исходных сырьевых материалов, использованных в экспериментальных исследованиях.....	38
2.2 Методы, принятые для исследований.....	41
Выводы по разделу 2.....	45
3 РАЗДЕЛ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНОВ.....	46
3.1 Влияние сульфоалюминатной расширяющей добавки на свойства цементного теста и цементного камня.....	46
3.2 Влияние оксидосульфоалюминатной расширяющей добавки на свойства цементного теста и цементного камня.....	56
3.3 Влияние разработанных модификаторов на фазовый состав цементного камня.....	63

3.4	Влияние расширяющих добавок на кинетику твердения бетона.....	77
	Выводы по разделу 3.....	83
4	РАЗДЕЛ 4. ВЛИЯНИЕ ПРИНЯТЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСШИРЯЮЩИХ ДОБАВОК НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНОВ.....	85
4.1	Оптимизация состава комплексного модификатора с расширяющей сульфоалюминатной добавкой по критериям подвижности смеси и прочности при сжатии.....	85
4.2	Оптимизация состава комплексного модификатора с расширяющей оксидосульфоалюминатной добавкой по критериям подвижности смеси и прочности при сжатии.....	93
4.3	Усадка модифицированных бетонов с расширяющими добавками.....	101
4.4	Эксплуатационные свойства модифицированных бетонов оптимальных составов.....	105
4.4.1	Морозостойкость бетона.....	105
4.4.2	Водонепроницаемость бетона.....	107
	Выводы по разделу 4.....	109
5	РАЗДЕЛ 5. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВО ТЯЖЕЛЫХ БЕТОНОВ С ПОНИЖЕННОЙ УСАДКОЙ.....	111
5.1	Инструкция по производству бетонных смесей для тяжелых бетонов с пониженной усадкой на основе комплексного модификатора.....	111
5.2	Экономическая эффективность.....	130
	Выводы по разделу 5.....	132
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	133
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	135
	ПРИЛОЖЕНИЕ А.	150
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.	153
	ПРИЛОЖЕНИЕ В.	154

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях строительства бетон и железобетон являются одними из основных конструкционных материалов. Только в российском строительстве в XX веке было использовано около 10 миллиардов кубометров бетона и железобетона. Мировой объем производства этой продукции достигает практически 3 миллиардов кубометров в год.

Несмотря на совершенствование технологии изготовления цементных композитов, которое привело к получению более высококачественных бетонов, это не смогло избавить их от одного из главных недостатков – усадочных деформаций. В результате усадки цементной составляющей бетона появляются трещины, которые в бетонных и железобетонных конструкциях снижают их долговечность вследствие попадания различных агрессивных веществ в эти трещины, что ведёт к развитию коррозии бетона и арматурной стали. Ремонт и восстановление бетона, как правило, связаны с высокими показателями трудоемкости и капитальных затрат, поэтому более экономичными являются мероприятия по предотвращению или минимизации усадочного трещинообразования в бетоне.

Для повышения эксплуатационных характеристик бетонов в настоящее время широко используются активные минеральные добавки, среди которых особое место занимают расширяющие. Введение таких добавок в бетон на портландцементе позволяет обеспечить высокую трещиностойкость и долговечность конструкции. При этом полученный бетон с использованием расширяющих добавок обладает не только всеми положительными характеристиками бетона на портландцементе, но и способствует повышению показателей растяжения при изгибе, снижению величины усадочных деформаций.

В условиях Донбасского региона наиболее перспективным вариантом является создание расширяющих добавок из местного сырья, что позволит сэкономить на зарубежных дорогостоящих добавках, а также способствовать улучшению экологической обстановки в регионе благодаря использованию

различных отходов промышленности для получения расширяющих добавок на минеральной основе с поволизт.

Актуальность темы исследования.

Бетонные смеси высокой подвижности имеют широкое применение в технологии монолитного и сборно-монолитного строительства, при бетонировании густоармированных конструкций, при наличии труднодоступных для уплотнения мест, конструкций со значительным модулем открытой поверхности и применении бетононасосов в процессе строительства как наиболее эффективного способа укладки. Для цементобетонных покрытий полов промышленных зданий, фундаментов под технологическое оборудование, покрытий автомобильных дорог, конструкций многоэтажных автостоянок, взлетно-посадочных полос аэропортов, мостовых сооружений из бетона класса по прочности не ниже В30, а значит с повышенным расходом цемента требуемая подвижность бетонных смесей должна достигаться без снижения показателей прочностных свойств и, особенно, без значительных усадочных деформаций получаемого бетона. Одним из современных способов регулирования деформационных свойств бетона является применение минеральных расширяющих добавок в составе комплексных модификаторов, которые способны влиять на микроструктуру бетона и его свойства. Однако, применение зарубежных фирменных расширяющих добавок приводит к повышению стоимости бетона. В связи с этим, исследования по разработке комплексных модификаторов на основе расширяющей добавки из отхода промышленности Донбасса, микрокремнезема и поликарбонатного суперпластификатора позволят обеспечить получение бетонов с пониженными показателями усадочных деформаций из смесей с высокой подвижностью.

Степень разработанности темы исследования

Вопросам регулирования и снижения собственных деформаций бетонов посвящены многочисленные работы российских и зарубежных ученых: С.В. Александровского [1, 2], И.Н. Ахвердова [3], Ю.М. Баженова [4], О.Я. Берга [5], П.П. Будникова [6, 7], А.Е. Десова [8], А.И. Звезда [9-11], В.И. Калашникова [12,

13], Т.В. Кузнецовой [14], Р. Лермита [15], Н.А Мощанского [16], О.П. Мчедлов-Петросяна [17], Г.В. Несветаева [18, 19], И.П. Павловой [20], М.Ю. Титова [21], З.Н. Цилосани [22], А.Е. Шейкина [23], М. Collepardi [24], А.В. Eberhardt [25], М. Wyrzykowski [26] и других. Однако, стоит отметить, что фундаментальные исследования, связанные с усадкой бетона, были в большей мере связаны с классическими цементными бетонами, формуемыми в основном по заводским технологиям, что в свою очередь предполагало небольшую подвижность бетонной смеси. В современных условиях строительства, как правило, изготавливают монолитные бетонные, железобетонные изделия из смесей с высокой подвижностью, а также заводские, но требующие минимизации вибрационных воздействий. Вопросы высокоподвижных смесей, содержащих различные комплексы минеральных добавок, которые в свою очередь вмещают расширяющие добавки, недостаточно изучены.

Целью исследования является теоретическое и экспериментальное обоснование получения тяжелых цементных бетонов с пониженной усадкой из высокоподвижных смесей на основе установления закономерностей влияния состава комплексных модификаторов (два типа расширяющей добавки, активная минеральная добавка, суперпластификатор и добавка, снижающая усадку) на структурообразование и свойства бетонной смеси и бетона.

Задачи исследования:

- выполнить анализ существующих представлений о составе, структуре и свойствах тяжелых цементных бетонов с пониженной усадкой из подвижных смесей и влиянии комплексных модификаторов на структурообразование бетонных смесей и бетонов;

- исследовать влияние комплексных модификаторов: два типа расширяющей добавки, суперпластификатор, микрокремнезем и добавка, снижающая усадку, на свойства цементного теста и бетонных смесей;

- изучить кинетику твердения бетона с комплексными модификаторами;

- установить закономерности влияния комплексных модификаторов на формирование состава продуктов гидратации цементного камня;
- выполнить оптимизацию состава комплексных модификаторов тяжелого цементного бетона с пониженной усадкой из подвижных смесей по критериям подвижности бетонной смеси и прочности бетона при сжатии;
- исследовать влияние комплексных модификаторов на усадку и эксплуатационные свойства бетона;
- оценить технико-экономические показатели разработанных составов модифицированного тяжелого бетона при осуществлении опытно-промышленного внедрения;
- разработать инструкцию по производству бетонных смесей в условиях модернизированного бетонно-растворного узла для тяжелых бетонов с пониженной усадкой, включающих комплексные модификаторы.

Объект исследования – тяжелые цементные бетоны с пониженной усадкой, включающие комплексные модификаторы.

Предмет исследования – процессы и явления, определяющие закономерности формирования структуры и свойств тяжелых цементных бетонов с пониженной усадкой из подвижных смесей, содержащих комплексные модификаторы.

Методы исследований. Экспериментальные исследования выполнены согласно стандартным и специальным методам с использованием аттестованных средств измерительной техники и испытательного оборудования. Состав продуктов гидратации вяжущего установлен по данным рентгенофазового анализа, выполненного на установке "Дрон-4-07". Оптимизация состава бетонов выполнена с помощью математических моделей. Для обработки и анализа результатов экспериментов применены методы математической статистики.

Научная новизна полученных результатов:

- осуществлено теоретическое и экспериментальное обоснование получения тяжелых бетонов с пониженной усадкой из подвижных смесей за счет

использования комплексных модификаторов, содержащих расширяющие добавки, активную минеральную добавку (микрокремнезем), поликарбоксилатный суперпластификатор и добавку SRA, снижающую усадочные деформации;

- установлено, что введение расширяющей добавки сульфоалюминатного типа в бетонную смесь приводит к расширению твердеющего бетона в раннем возрасте, что подтверждается рентгенофазовым анализом, в частности, повышением интенсивности дифракционных отражений линий этtringита ($d=0,388; 0,349; 0,220$ нм), а при введении расширяющей добавки оксидосульфоалюминатного типа помимо интенсивного роста этtringита дополнительное образование $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=0,263; 0,193; 0,179$ нм);

- установлено, что комплексные модификаторы с расширяющими добавками, как на основе шамотно-каолиновой пыли и гипса, так и с введением шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести, в составе тяжелых бетонов снижают усадочные деформации и повышают прочность, среднюю плотность, водонепроницаемость, морозостойкость;

- определены области оптимальных составов комплексных модификаторов бетонных смесей по содержанию расширяющих добавок и поликарбоксилатного суперпластификатора для получения бетонных смесей с показателем подвижности по осадке конуса в пределах 16-21 см, при достаточно высоком расходе цемента, обеспечивающих снижение усадки бетона.

Практическое значение полученных результатов:

- разработана инструкция по производству бетонных смесей в условиях модернизированного бетонно-растворного узла для тяжелых бетонов с пониженной усадкой, включающих комплексные модификаторы;

- определена технико-экономическая эффективность применения разработанных комплексных модификаторов в подвижных бетонных смесях для получения тяжелого бетона с пониженной усадкой;

- результаты исследований внедрены в учебный процесс Института строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства Луганского

государственного университета имени Владимира Даля при подготовке студентов по направлению 08.03.01, 08.04.01 «Строительство» в курсах дисциплин: «Строительные материалы», «Перспективы развития строительного материаловедения, ресурсо- и энергосбережение в городском строительстве».

Положения, выносимые на защиту:

- обоснование возможности получения тяжелых бетонов с пониженной усадкой из подвижных смесей с высоким расходом цемента на основе установления закономерностей влияния комплексных модификаторов, содержащих расширяющие добавки, на процессы формирования структуры и свойств бетона;

- результаты экспериментальных исследований влияния комплексных модификаторов с расширяющими добавками на свойства бетонных смесей и бетонов;

- результаты оптимизации составов комплексных модификаторов тяжелых цементных бетонов с пониженной усадкой из подвижных смесей.

Степень достоверности результатов работы обеспечивается выполнением экспериментальных исследований на современном и поверенном стандартном оборудовании; статистической обработкой полученных результатов с заданной вероятностью и необходимым количеством повторных испытаний с сопоставлением результатов с аналогичными результатами, полученными другими авторами.

Апробация диссертационной работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры строительных конструкций Луганского НАУ (2017-2019 гг.) и ежегодных научно-технических конференциях строительного факультета ЛНАУ (2017-2019 гг.). Материалы диссертации докладывались также на: XVI-XX международные конференции "Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий" (г. Макеевка, ГОУ ВПО «ДонНАСА», 2017-2021 гг.); II-V международные научно-практические конференции "Возрождение, экология,

ресурсосбережение и энергоэффективность инженерной инфраструктуры урбанизированных территорий Донбасса: традиции и инновации" (г. Луганск, ГОУ ВПО ЛНУ им. В.И. Даля, 2017-2020 гг.); научно-практической конференции с международным участием "Проблемы и перспективы современной науки" (межотраслевой) (г. Луганск, ГОУ ЛНР ЛНАУ, 11-15 декабря 2017 г.); I-II международные научно-технические конференции "Реконструкция и восстановление Донбасса. Строительные материалы, конструкции и изделия" (г. Луганск, ГОУ ЛНР ЛНАУ, 28 ноября 2018-2019 гг.); международной конференции "Научные чтения памяти доцента кафедры технологии строительных конструкций, изделий и материалов Александра Дмитриевича Лазько" (г. Макеевка, ГОУ ВПО «ДонНАСА», 27 декабря 2018 г.); научно-практической конференции "Интеграция науки и практики как условие продовольственной безопасности" (г. Луганск, ГОУ ЛНР ЛНАУ, 23 января 2019 г.); научно-практической конференции с международным участием «Электроповерхностные явления при формировании структуры строительных материалов на основе минеральных и органических вяжущих веществ (посвящена 65-летию кафедры ТСКИиМ и 70-летию д.т.н., проф. Матвиенко В.А.)» (г. Макеевка, ГОУ ВПО «ДонНАСА», 25 декабря 2020 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы автором самостоятельно и в соавторстве в 15 научных изданиях, в том числе шесть публикаций – в рецензируемых научных изданиях, пять публикаций – в материалах научных конференций, четыре публикации – в других изданиях.

Структура и объем работы диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованных источников из 147 наименований и приложений. Содержит 154 страницы машинописного текста, в том числе 112 страниц основного текста, 22 полных страниц с рисунками и таблицами, 15 страниц списка использованных источников, пять страниц приложений.

РАЗДЕЛ 1

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ УСАДКЕ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНА

1.1 Усадка цементного камня и бетона как фактор долговечности бетонных конструкций

Одним из требований к любому конструктивному материалу является долговечность, то есть способность его в определенных условиях внешнего воздействия не изменять свои свойства. При этом большинство материалов теряют свои свойства вследствие развития в них трещинообразования, разделяющих его на отдельные элементы, неспособные противостоять воздействиям внешней среды. Для тяжелых цементных бетонов зарождение и развитие в нем трещин, способствует попаданию различных агрессивных веществ в эти трещины, что ведёт к развитию коррозии бетона и арматурной стали. Как правило, возникновению трещин в изделиях из бетона способствуют деформации усадки и расширения [2, 27-31].

В настоящее время накоплено значительное количество материалов об объемных изменениях цементного камня и бетона [3, 5, 32]. Деформации бетона условно разделяют на следующие виды: собственные деформации бетонной смеси (первоначальная усадка) и бетона (усадка и расширение), которые возникают под действием физико-химических процессов, протекающих в бетоне, а также деформации от действия механических нагрузок, при этом различают деформации от кратковременного действия нагрузок и от длительного действия – ползучесть бетона, температурные деформации бетона.

По терминологии авторов [33, 34] собственные напряжения в бетонах делятся на внутренние, или «напряжения первого рода» и структурные - «напряжения второго рода», обусловленные анизотропией структуры бетона.

Собственные деформации обусловлены процессами структурообразования бетона и являются неотъемлемой частью этого процесса [33, 34].

Как собственные деформации бетонной смеси, так и деформации бетона от действия механических нагрузок играют важную роль в формировании его структуры. Исключить собственные деформации из процесса формирования структуры бетона нельзя, можно только регулировать их величину. Развитие деформаций, обусловленных влажностной усадкой, вызывает в структуре бетона напряжения, в ряде случаев сопоставимые с пределом прочности, что приводит к образованию усадочных трещин, и как следствие потере их долговечности [33, 35].

Исследованию закономерностей развития усадочных деформаций цементного камня и бетона посвящены работы И.Н. Ахвердова [3, 27], С.В. Александровского [1, 2, 36, 37], О.Я. Берга [5], Р. Лермита [15], Н.А. Мощанского [16], А.Е. Шейкина [23, 38, 39], Миненко Е.Ю. [40], З.Н. Цилосани [22] и др.

1.2 Классификация видов усадки бетона и современные представления о её механизме

Усадочные деформации бетона связаны с химическими и физическими процессами, происходящими при взаимодействии цемента с водой, изменением влажности цементного камня при его высыхании, а также при взаимодействии продуктов гидратации с проникающими из внешней среды компонентами. В связи с этим в бетоноведении выделяют четыре разновидности усадки твердеющего бетона: пластическую, аутогенную, влажностную (усадка при высыхании) и карбонизационную. При этом сложность прогнозирования величины полной усадки, как правило, связывают с тем, что каждая ее составляющая обусловлена различными ведущими условиями. Поэтому многие исследователи упрощают модель, рассматривая только влажностную усадку [41, 42].

По современным представлениям, согласно EN 1992-1-1 [43] усадка включает в себя два компонента, в частности – усадку при высыхании и

собственную усадку. Усадка при высыхании является результатом испарения влаги из бетона в окружающий воздух. Собственная же усадка, по определению справочных документов к EN 1992-1-1, определяется как «макроскопическое уменьшение объема цементирующего материала при гидратации цемента. Усадка не включает в себя изменения объема, связанные с потерей или поглощением веществ, с изменением температуры или приложением внешней силы или внешнего ограничения деформаций». Собственная усадка в полной мере обратно пропорциональна водоцементному отношению и более существенна для высокопрочных бетонов.

Влажностные деформации цементного камня изучены в работах многих советских и зарубежных ученых: С.В. Александровского [1, 2, 36, 37], Р. Лермита [15], Н.А. Мощанского [16], Т. Пауэрса [44], В. Рамачандран [45], З.Н. Цилосани [22], А.Е. Шейкина [23, 38, 39] и других.

Влажностная усадка вызывается изменением распределения влаги, её перемещением в цементном камне и испарением. Усадочные напряжения возникают при отсутствии гигроскопического равновесия с воздухом, при этом влажный капиллярно-пористый бетон высыхает, уменьшаясь в объеме. Вследствие небольшого коэффициента диффузии влаги его высыхание происходит неравномерно, поэтому образуются градиенты влажности, ведущие к усадочным напряжениям.

Усадка при высыхании по своей природе различна и складывается из капиллярной и адсорбционной составляющих. Испарения воды начинаются из крупных пор и капилляров, затем из микропор и мелких капилляров. При этом возникают силы капиллярного сжатия, в связи с чем цементный камень претерпевает деформацию сжатия. Возникающая вследствие этого усадка носит название капиллярной.

После удаления капиллярной воды начинает удаляться адсорбционная и структурно-связанная вода. Первоначально удаляется вода из ячеек, образованных мелкими кристаллами продуктов гидратации цемента из полимолекулярно-

адсорбированных слоев. Последней удаляется вода, адсорбированная в виде мономолекулярных слоев. Это удаление, как правило, сопровождается значительным сжатием цементного камня. Развивающуюся при этом усадку, называют адсорбционной.

Ряд исследований, как середины XX века, так и современные свидетельствуют, что физическая природа влажностной усадки является темой дискуссионной [2, 38, 45]. Природа различных явлений, происходящих в цементном камне и бетоне, связанных с изменениями их влажности, описана в работе З.Н. Цилосани [22]. Основной причиной развития усадочных деформаций, по его мнению, считаются капиллярные явления. Признавая капиллярные явления, некоторые авторы [1, 37] придают значение и стабилизирующему действию тонких пленок воды в межзерновом пространстве.

Согласно З.Н. Цилосани капиллярная усадка цементного камня прямо-пропорциональна капиллярной пористости и среднему диаметру капилляров. Чем выше капиллярная пористость и чем меньше средний радиус капилляров, тем больше капиллярная усадка цементного камня [22].

По мнению С.В. Александровского, А.Е. Шейкина, Л.М. Щербакова капиллярная составляющая усадки связана с микроскопическими искривлениями поверхности жидкости на границе раздела фаз, а изменения молекулярного давления при этом не велики и носят второстепенный характер [1, 37, 38].

По ранее выполненным исследованиям разработано и сформулировано значительное количество гипотез и теорий, объясняющих природу усадочных деформаций цементного камня и бетона.

Наибольшим признанием пользуется структурная теория А.Е. Шейкина [38]. По его мнению, максимальная усадка влажного цементного камня проявляется только в условиях квазистатической сушки, когда усадочная деформация протекает равномерно по всему объему в полном соответствии с изменением его влагосодержания.

Основным положением гипотезы А.Е. Шейкина является наличие в цементном камне таких структурных составляющих как кристаллический сросток и субмикрористаллический гель, который заполняет скелет кристаллического сростка и при высыхании дает значительную усадку. В соответствии со структурной теорией усадки А.Е. Шейкина усадочные деформации тем больше, чем больше объем геля в единице объема кристаллического сростка цементного камня. Величина усадки зависит от содержания в цементном камне крупных кристаллов новообразований, создающих каркас и, уменьшающих усадочные деформации [38]. Следует отметить, что потеря воды, вызывающая усадку, может также происходить из-за отсоса воды в непрореагировавшие частицы цемента, поэтому усадочные деформации могут наблюдаться и при исключении испарения. С течением времени, при твердении цемента, происходит упорядочение и увеличение объема кристаллического сростка, что ведет к затуханию процесса усадки [39].

Также по данным А.Е. Шейкина следует, что испарение межплоскостной воды происходит только при относительной влажности менее 45%, так как зависит от степени заполнения порового пространства цементным гелем. В условиях квазистатической сушки из цементного камня начинает удаляться и адсорбционно-связанная влага, которая удерживается на поверхностях кристаллов тоберморита Ван-дер-Ваальсовыми силами ориентированного взаимодействия. При удалении адсорбционно-связанной воды усадка принимает частично необратимый характер, так как на определенном этапе твердения цемента между частицами тоберморитового геля могут возникать ковалентные и ионные связи [23].

Дж. Бернал, исходя из слоистого характера строения гидросиликатов кальция, полагает, что большая часть воды, испарение которой из цементного камня сопровождается усадкой, находится между слоями структуры гидросиликата кальция. В связи с этим, основной причиной усадки, по его мнению, является испарение межплоскостной воды из тоберморитового геля. Теорию Дж. Бернала разделяют Ф. Ли и другие ученые [45, 46].

Исследования, проведенные Г. Калоусеком, показали, что испарение воды из межслоевого пространства кристаллов тоберморита и тоберморитовых фаз, каким является CSH (В), сопровождается интенсивной усадкой при наиболее низкой относительной влажности воздуха. Причем силы, освобождающиеся при испарении воды из гелевых пор, а также из слоистых кристаллов гидросиликатов кальция, настолько значительны, что не только компенсируют набухание системы после исчезновения капиллярных сил, но и вызывают дополнительные деформации усадки [32].

По мнению автора [47] силы Ван-дер-Ваальса, адсорбционно удерживающие воду в гелевых порах, освобождаются при ее испарении и вызывают усадку цементного камня. Причиной его усадки на конечной стадии высыхания является испарение воды из кристаллов гидросиликатов кальция. Причем некоторые из них, обладая слоистой кристаллической решеткой, способны отдавать и принимать определенное количество воды, заключенной между слоями решетки, что сопровождается соответствующими изменениями расстояний между слоями.

В частности, по данным исследований отечественных ученых [47], гидросиликаты кальция с соотношением C/S = 0,8-1 и содержанием до 2,5-2,8 молекул воды на одну молекулу SiO₂ ступенчато теряют часть воды при относительной влажности воздуха 35%. Остальная часть связанной воды постепенно удаляется при дальнейшем снижении влажности окружающей среды.

Теория, сформулированная И.Н. Ахвердовым [13, 27] сводится к тому, что при твердении цементного геля, внутри образующихся кристаллов, молекулы воды группируются вокруг ионов кальция и других минералов. При этом создаются новые сорбционные объемы и размеры кристаллов увеличиваются. При десорбции паров воды происходит обратное явление. Изменения, вызванные адсорбцией и десорбцией паров воды, приводят к изменению микrorазмеров всей структуры.

Таким образом, уменьшение объема цементного камня при высыхании вызывается рядом причин:

- действием капиллярных сил, возникающих в цементном камне при испарении воды из капилляров;
- удалением адсорбционно-связанной воды из тоберморитового геля;
- структурными изменениями, происходящими при превращении вязкопластического цементного геля в камневидное состояние и в нарушении гигроскопического равновесия в его порах.

Обобщая литературные данные о механизме и причинах рассматриваемых объемных изменений цементного камня и бетона можно заключить следующее.

По представлениям ряда исследователей усадочные деформации цементного камня связаны с обезвоживанием субмикрочастиц его гелевидной составляющей. Отдача ими пленочной воды вызывает уменьшение толщины пленок, сближение кристаллов и усадку гелевой составляющей, которая и обуславливает общую усадку цементного камня. При обводнении микрочастиц гелевидной составляющей цементного камня толщина водных пленок вокруг них увеличивается, в результате чего происходит их раздвижка и, следовательно, увеличение объема цементного камня, то есть его набухание [27].

Изменение содержания воды в капиллярах и порах цементного камня вызывает изменения сил капиллярного давления, которое сжимает или расширяет скелет цементного камня. Так, с уменьшением водосодержания происходит ослабление этих сил и уменьшение объема цементного камня. В результате развиваются деформации усадки и набухания цементного камня.

Пластическая усадка способна приводить к образованию трещин на поверхности бетона конструкций с большим модулем открытой поверхности. Она происходит в свежесформованном бетоне в период от начала до конца схватывания. Величина этой усадки зависит от параметров окружающей среды и температуры бетона [48].

Аутогенная усадка высококачественных бетонов, если ее не контролировать, может достигать больших значений деформаций в течение всего лишь 24 часов (до величины $\varepsilon = -250 \times 10^{-6}$ и более), что приводит к раннему трещинообразованию, если

усадка проявляется в стесненных условиях. Обезвоживание пор отражается не только на возникновении усадки, но и на кинетике гидратации вяжущего, лимитируя ее степень [24]. При этом, минеральные добавки, в частности, микрокремнезем увеличивает снижение относительной влажности и величины аутогенной усадки цементного камня на ранних стадиях твердения, а молотый доменный граншлак – на поздних [42].

Также одной из составляющей суммарной усадки является карбонизационная усадка. Данный тип усадки изучался многими исследователями. Наиболее ранние исследования карбонизационной усадки выполнены Ф. Ли [46].

Карбонизационная усадка является следствием уменьшения объема затвердевшего цементного камня, в результате химического взаимодействия гидроксида кальция с углекислым газом, содержащимся в воздухе [45]. Карбонизация сопровождается потерей значительного количества химически связанной воды, в результате образования кремнекислоты. Чем выше степень карбонизации материала, тем больше его деформации усадки. Интенсивность процесса карбонизации, протекающего на воздухе в бетоне различной плотности, по данным А.А. Байкова и В.М. Москвина, достигает 1-5 мм в год. Поэтому, значительное увеличение усадки при воздействии углекислого газа происходит только после длительного выдерживания бетона на воздухе [44].

1.3 Закономерности влияния компонентов бетона на усадку и возможности её регулирования

Основными факторами, определяющими усадку бетона, являются вид и химико-минералогический состав используемых цементов, тонкость его помола, количество в цементе гипса и других минеральных солей, вид и количество вводимых добавок [36, 38, 49, 50]. Усадка цементного камня и бетона существенно зависит также от его состава, в частности, водоцементного отношения и расхода цемента на 1 м³ бетона, вида и характеристик применяемых заполнителей [38, 51,

52]. Влияние перечисленных факторов оказывает неоднозначное влияние на конечную усадку и на характер ее протекания во времени.

По ранее выполненным исследованиям накоплен значительный объем материала о влиянии химического и минералогического состава цементов на усадку бетонов и растворов. В работах советских и зарубежных ученых [4] исследовалась усадка бетонов, изготовленных на цементах разных видов, в которых содержание основных минералов клинкера, щелочей и сульфата кальция колебалось в пределах для обычных портландцементов [52].

Тонкомолотые, высокоалюминатные цементы обладают большей усадкой, особенно в начальный период твердения. Так, например, по данным Гленвиля, глиноземистый цемент в возрасте 7 суток твердения показал усадку, достигающую почти 40% от величины усадки в возрасте 1,5 года [14]. Усадка цементного камня на рядовых портландцементов не превышала за это время 8% полуторагодичной усадки.

Результаты исследований А.А. Ананенко свидетельствуют, что, варьируя химический и минералогический составы цементов, можно изменять величину усадочных деформаций бетонов более, чем в два раза [51].

М. Шпиндель, исследуя контракционную усадку цементного теста с момента затворения установил, что цементы более тонкого помола имеют усадку значительно большую, чем цементы рядового помола. При этом значительная часть усадочных деформаций была реализована до конца схватывания. Абсолютная величина этой усадки превышала усадку цементного камня в возрасте 28 суток [52].

Значительное влияние на деформации усадки оказывает минералогический состав цемента. Наибольшей усадкой характеризуются C_3A и C_3S . Белит и алюмоферрит оказывают наименьшее влияние на усадку. По данным Стейнора [53] усадка C_3A в возрасте 28 суток достигает 0,46 мм/м, β - C_2S – 0,77 мм/м, C_3S – 2,34 мм/м и C_4AF – 0,49 мм/м.

Одним из способов устранения отрицательных последствий усадки в бетоне является применение в качестве вяжущего напрягающего цемента, состоящего из

портландцемента, алюмосодержащего компонента и гипса [9]. Напрягающие цементы предназначены для создания в бетоне деформаций расширения, равных или незначительно превышающих деформации усадки, что повышает способность бетона сопротивляться комплексу силовых и не силовых воздействий в условиях эксплуатации.

Опираясь на теоретические представления о преобладающем влиянии влажностной составляющей в полной усадке бетона, логично предположить, что фактор водосодержания и водоцементного отношения будут иметь определяющую роль. В этой связи бетоны с низкими водоцементными отношениями характеризуются низкими показателями пористости и, как следствие, малыми деформациями усадки. С повышением водоцементного отношения и увеличением пористости происходит более интенсивный влагообмен цементного камня с внешней средой, снижается сопротивление его кристаллического сростка объемным изменением геля [14]. И наоборот, при малых водоцементных отношениях и снижении пористости, указанные обстоятельства действуют в обратном направлении, что сказывается на уменьшении усадки.

Также на величину усадки бетона значительное влияние оказывает гранулометрический состав заполнителя и модуль открытой поверхности бетона. В зависимости от модуля поверхности формируется размер цементной оболочки, обволакивающей зерна заполнителя. При усадке цементного камня в местах, где расстояния между зернами заполнителя и прилегающих к ним поверхностных слоях цементного камня наименьшие, возникают тангенциальные растягивающиеся и сжимающиеся напряжения, уменьшающие его усадку [27].

Повышение расхода цемента при низких водоцементных отношениях и соответствующей интенсивности уплотнения способствует снижению пористости бетона и повышению его плотности, прочности, то очевидно, что высокопрочные бетоны должны обладать меньшей усадкой в сравнении с обычными бетонами.

Как было показано выше, снижение суммарных усадочных деформаций бетона достигается в основном за счет пониженного водосодержания и

уменьшения влажностной составляющей усадки. Понижение водосодержания бетонных смесей (в частности для получения бетонов высокой прочности) требует применения высокоэффективных разжижителей. В связи с этим при производстве бетонов предъявляются особо жесткие требования к суперпластификаторам, которые должны обладать не только высокой реологической активностью, но и минимальным воздействием на формирование его структуры и физико-механические показатели в процессе эксплуатации [54].

1.4 Существующие способы снижения усадки

Выделяют следующие способы минимизации усадочных деформаций и повышения трещиностойкости:

- применение расширяющихся цементов или расширяющих добавок;
- использование бетонов с пониженным содержанием песка;
- снижение количества воды и водоцементного соотношения;
- использование добавок, снижающих или компенсирующих усадку;
- внутренний и внешний уход за бетоном.

Одним из традиционных способов компенсации усадки бетона является сокращение количества воды затворения. Для этого, как правило, применяют пластифицирующие добавки, используют жесткие смеси, уменьшают расход вяжущего, подбирают фракционный состав заполнителей. Немаловажное значение имеют также минералогический состав и тонкость помола цемента. Также одним из способов уменьшения или устранения усадочных деформаций является применение специальных цементов, способных компенсировать усадку. В результате многолетних исследований отечественных и зарубежных ученых был создан новый вид вяжущих – расширяющиеся цементы, которые способны решить эту проблему [55].

По данным ряда работ известно свыше 50 видов расширяющихся цементов, отличающихся как по способам производства, так и по видам расширяющих компонентов. В качестве расширяющих компонентов могут использовать [56]:

- природные материалы, которые после теплообработки будучи добавленными к цементу, обеспечивают образование гидросульфоалюмината кальция при его гидратации;

- сульфоалюминатный клинкер, который получают при обжиге смеси известнякового, глиноземистого компонента и гипса, рассчитанной на получение сульфоалюмината кальция;

- сульфоферритный клинкер, получаемый обжигом смеси из гипса и железосодержащего, известнякового компонента;

- промышленные продукты, которые могут содержать в своем составе алюминаты кальция (сталерафинировочные, глиноземистые шлаки, шлаки от производства ферробора, феррохрома, ферротитана).

Механизм расширяющихся цементов состоит в том, что при твердении образуется значительное количество гидросульфоалюмината кальция, кристаллизация которых в условиях, наиболее препятствующих их свободному расширению, вызывает дополнительное уплотнение цементного камня и растворов. Гидросульфоалюминат кальция кристаллизуется при взаимодействии кристаллов высокоосновных гидроалюминатов кальция с ионами Ca^{2+} и SO_4^{2-} растворенного в воде сульфата кальция. Как правило, это характерно для реакций, протекающих при твердении цемента, когда жидкая фаза насыщена известью и образовавшиеся высокоосновные гидроалюминаты кальция поэтому не растворяются в ней. Формирование кристаллических новообразований, которые содержат большое количество воды, вызывает в этом случае быстрое увеличение объема, образовавшегося гидросульфоалюмината кальция, сравнивая с исходным объемом гидроалюмината. При низкой концентрации извести в жидкой фазе, свойственной среде твердеющего глиноземистого цемента, низкоосновные гидроалюминаты кальция растворяются и, при этом, гидросульфоалюминат

кальция образуется из раствора при взаимодействии гидроалюминатов кальция с ионами SO_4^{2-} и Ca^{2+} растворенного гипса. Гидросульфалюминат кальция заполняет объем исходного раствора и последующий рост его кристаллов вызывает небольшое увеличение объема [53].

По причине большой потребности строительной промышленности в расширяющихся цементах разработкам их технологии, изучению свойств, оптимизации составов уделяется большое внимание исследователей во всем мире.

Так за рубежом расширяющиеся цементы производятся в США, Японии, Италии, Китае и в некоторых других странах. По данным [14] общий объем производства таких цемента в мире составляет около 1 миллиона тонн в год. В зависимости от вещественного состава и рецептуры американская международная организация ASTM International в своем стандарте C-845 «Standard Specification for Expansive Hydraulic Cement» классифицирует следующие типы расширяющихся цемента [57, 58]:

- цемент типа К (цемент А. Клейна), получение которого основано на совместном помоле портландцемента и сульфалюминатной добавки, представляющей собой смесь сульфалюмината кальция, свободной извести и свободного ангидрита;

- цемент типа М (цемент В.В. Михайлова), представляющий собой смесь портландцементного клинкера, гипсового камня и глиноземистого цемента. Также возможно дополнительное введение некоторого количества гидроксида кальция (свободной извести) и замена глиноземистого цемента алюмосодержащим компонентом (алюминатные шлаки). Цемент типа М относится к напрягающим;

- цемент типа S – портландцемент с повышенным содержанием трехкальциевого алюмината и гипса.

Технологии изготовления сульфалюминатных, сульфоферритных и сульфалюмоферритных клинкеров, освоенные на ряде заводов России и в странах СНГ, показали высокую эффективность выпуска на основе данных клинкеров

расширяющихся и напрягающих цементов и применения последних в строительстве.

Для получения малоусадочных бетонов и бетонов с компенсированной усадкой особое место занимают расширяющие добавки, при введении которых при твердении портландцемента происходит увеличение линейных размеров, что позволяет обеспечить высокую трещиностойкость и долговечность конструкций. Благодаря этому бетон с расширяющими добавками нивелирует большие усадочные деформации [9, 59]. Введение расширяющей добавки непосредственно в процессе приготовления бетонной смеси регулирует энергию расширения вяжущего, что позволяет получать бетоны как с компенсированной усадкой, так и напрягающие с различной энергией самоупрочения.

Анализируя данные, представленные в отечественной и зарубежной литературе, расширяющие добавки можно разделить условно на четыре типа (рисунок 1.1).

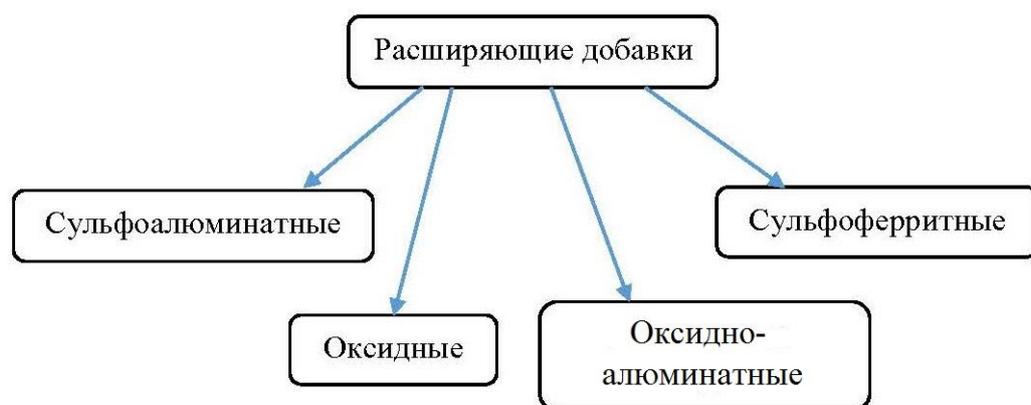


Рис. 1.1. Типы расширяющих добавок

Расширяющие добавки всех типов можно получать как спеканием сырьевой массы в камерных, туннельных и вращающихся печах, а также плавлением в доменных или электрических печах, так и с помощью механического помола готовых продуктов (в частности, отходов различных производств) [21].

В качестве сульфоалюминатной расширяющей добавки обычно выступает смесь из высокоглинземистого и сульфатного компонента, а также активатора, т.е. дополнительного материала, используемого для активизации добавки. В этом

типе добавки расширение осуществляется при взаимодействии алюминатных и сульфатсодержащих фаз с образованием игольчатых кристаллов этtringита.

В качестве алюминатных компонентов могут применяться материалы, содержащие C_3A , CA_2 , $C_{12}A_7$, C_4A_3S и т.д., а в качестве сульфатсодержащих – гипс, ангидрит и пр.

Сульфоалюминатная добавка является широко распространенной и достаточно изученной. И в большинстве зарубежных научных трудах и патентах описывается получение данной добавки путем высокотемпературного обжига специально подготовленных материалов [60].

Следует отметить, что добавки, которые получают путем обжига, по технологии их производства являются довольно сложными и недешевыми процессами. Хотя, при этом, они получают более стабильные химические и минералогические составы в сравнении с добавками, которые получают более простыми способами [21].

Добавки оксидной группы способны вызывать расширение цементного камня вследствие гидратации CaO и MgO с последующим образованием гидроокисей [61]. В процессе гидратации CaO происходит образование и рост кристаллов $Ca(OH)_2$, что вызывает интенсивное увеличение объема и влияет на величину расширения. MgO в сравнении с CaO гидратируется медленнее и в нормальных условиях твердения цемента с данной добавкой не показывает заметного расширения. На скорость превращения CaO в $Ca(OH)_2$ влияет температура обжига $CaCO_3$ и дисперсность образующегося оксида кальция. CaO , полученный путем обжига $CaCO_3$ при температуре $850\text{ }^\circ\text{C}$, практически не вызывает расширения. При повышении температуры обжига до $1000\text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается увеличение деформаций расширения, а при температуре обжига $1100\text{ }^\circ\text{C}$ наблюдаются наибольшие деформации и расширение происходит в первые 8-10 ч гидратации [62]. Так, иракский исследователь К. Маршди в своей работе [63] получил расширяющую оксидную добавку путем обжига доломитизированного известняка при температуре $1150\text{ }^\circ\text{C}$ в течение часа.

Также, К.Г. Красильников с коллегами считает, что в процессе расширения происходит формирование большого числа мелких кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Данные кристаллы в основном расположены на поверхности исходных зерен CaO , т.е. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ не заполняет поры или другие полые пространства структуры. Подобная локализация кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ образует в структуре скопления, которые при росте кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ увеличиваются в объеме и давят на соседние участки структуры, вызывая ее расширение [64, 65].

Расширение добавки оксидносульфоалюминатного типа происходит как за счет образования гидросульфоалюмината кальция, также называемого этtringитом, так и за счет гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (по аналогии с оксидной группой). Механизм расширения возможен при введении в состав бетона свободной извести и при применении алюмосодержащей и сульфосодержащей добавок. В данных условиях на кинетику образования этtringита влияет присутствие $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [17, 21, 66]. Концентрация $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в жидкой фазе зависит от скорости гидратации портландцемента, т.е. от скорости перехода $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в жидкую фазу, и от скорости образования гидросульфоалюмината кальция. В свою очередь, скорость образования этtringита можно регулировать путем дополнительного введения в систему $\text{Ca}(\text{OH})_2$ или присутствием свободного CaO в портландцементе [17, 21, 64, 66, 67].

Получение расширяющих добавок данной группы отражены во многих работах и патентах исследователей. В одном из патентов [68] автор готовит добавку обжигом смеси из глины, извести и боксита; в другом [69] из смеси сульфата кальция, извести и глины; в еще одном патенте [70] описывается технология, при которой расширяющая добавка получается плавлением сырьевой смеси белого боксита, ангидрита и извести; а в [71] предлагается технология совместного измельчения отдельно приготовленных алюминатов кальция, $\text{CaO}_{\text{св}}$ и CaSO_4 .

В своей работе Титов М.Ю. [21] испытал комплексную добавку из циклонной пыли керамзитового производства в качестве алюминатного компонента, гипсовый камень в качестве сульфатного и дополнительным активатором выступил

обожженный доломит. Однако, по результатам экспериментов автор не рекомендует использовать такую добавку в качестве базовой из-за нестабильности состава сырьевых материалов.

Также одним из эффективных современных способов снижения усадки бетона является применение добавки, снижающей усадку – Shrinkage Reducing Admixtures (SRA) [72]. Техническая информация о добавках SRA появилась в 1980-х в Японии (первая публикация по бетонам с добавкой SRA – 1983 г., Goto, Sato) [73]. Добавки на основе низкомолекулярных полиоксиалкиленалкилэфиров обеспечивали значительное снижение влажностной усадки, а также уменьшение количества и протяженности трещин в случае стесненной усадки [74]. Позже появилась информация о добавках SRA на основе этиленгликоля или полипропиленгликоля [73, 75-77].

SRA обычно рассматривают как синергетическую смесь неионного ПАВ и гликоля. Гликоль также проявляет поверхностную активность на границе раздела фаз, вызывая снижение поверхностного натяжения жидкости [25, 78, 79]. Молекулярная структура представлена двумя частями: гидрофобной (неполярный углеводородный радикал) и гидрофильной группами (полярная головка), молекула получена реакцией этоксилирования. Гидрофильная головка может быть ионной или неионной, притягивается полярными и водородными связями растворителя (например, вода) и противоположно заряженных поверхностей. Гидрофобный хвост притягивается неполярными растворителями (например, масло), но отталкивается полярными молекулами, такими как вода [80].

Добавки SRA, проявляют эффект, прежде всего, за счет снижения поверхностного натяжения поровой жидкости на границе раздела фаз "Ж-Г", что обеспечивает уменьшение капиллярного давления, вызванного формированием менисков [24, 25, 73, 77, 80-84].

Следует также отметить, что по мере развития процесса гидратации цемента концентрация SRA в поровой жидкости увеличивается. Это связано с тем, что часть воды затворения связывается в процессе гидратации, в то время как SRA не

связывается продуктами гидратации (по крайней мере, с той же скоростью, как вода). Таким образом, концентрация SRA в свободной поровой жидкости увеличивается. Подобное явление также происходит, когда бетон подвергается сушке, и вода испаряется, а SRA остается в поровом растворе [80].

Исходя из своего основного назначения, добавки SRA рекомендованы к применению в случае, когда трещинообразование может существенно отразиться на долговечности железобетонных конструкций. За счет значительного снижения влажностной усадки бетона (на 30-80 %) достигается более высокая стойкость к трещинообразованию как в ранние, так и поздние сроки твердения [73, 74, 76, 81, 84, 85]. Кроме уменьшения поверхностного натяжения поровой жидкости добавки обеспечивают также значительное снижение скорости испарения и потерь массы вследствие испарения влаги, особенно в ранние сроки твердения [73, 81]. В результате можно ожидать положительного влияния добавок на снижение пластической усадки бетона, о чем свидетельствуют результаты исследований ряда ученых [80, 81].

Положительное влияние добавок SRA на снижение усадки бетона также связывают со слабым их пластифицирующим (водоредуцирующим) эффектом [73, 83], хотя в работах [72, 80] отмечено, что добавки, снижающие усадку, не являются водопонизителями, поэтому должны применяться в сочетании с суперпластификаторами.

В исследованиях Н.М. Зайченко, А.В. Назаровой, М. Косая [86] изучено влияние комплексного модификатора в виде расширяющейся добавки на основе обожженного доломитизированного известняка и добавки, снижающей усадку бетона, на основе полипропиленгликоля Marsecure SRA, на показатели стесненного расширения (усадки) высокопрочного бетона. Установлено, что при твердении в течение семи суток в воде все исследуемые образцы-призмы бетона показали расширение, при этом наибольшие абсолютные значения зафиксированы для бетона, который содержит комплекс добавок «SRA + расширяющийся компонент». После извлечения образцов из воды и последующей их выдержки в воздушно-

сухих условиях ($t=22-27^{\circ}\text{C}$, $\varphi=75-67\%$), в бетоне развивается стесненная усадка, которая наиболее характерно проявляется в образце контрольного состава, достигая в возрасте 28 суток величины $\epsilon=-331$ мкм/м. Наличие в бетоне комплекса добавок «SRA + расширяющийся компонент» способствовало тому, что на всем протяжении исследования данный образец показывал остаточное расширение $\epsilon=+19$ мкм/м. Гипотезой синергизма компонентов комплексной добавки является тот факт, что с понижением растворимости образующегося гидроксида кальция расширение системы повышается. Добавка, снижающая усадку SRA, может снижать диэлектрическую проницаемость воды и, следовательно, её способность растворять соли. И поэтому добавка SRA может снижать растворимость гидроксида кальция, способствуя более полному расширению цементной системы. Несмотря на это, данный синергетический эффект требует дальнейшего детального изучения и обоснования.

Также последнее время широко распространено применение в составах тяжелых бетонов различного рода органоминеральных модификаторов комплексного действия, которые могут положительно повлиять на снижение усадочных деформаций по сравнению с бетонами без этих модификаторов.

В Российской Федерации применение получили органоминеральные добавки, в виде комплекса суперпластификатора и микронаполнителя, обладающие конкретным модифицирующим эффектом. Например, МБ-01 в виде комплекса суперпластификатора С-3 и микрокремнезема или МБ-С, включающий С-3, микрокремнезем, золу-унос [87-91].

По данным Батракова В.Г. усадка бетона с микрокремнеземом, вводимым в бетон в количестве 116 кг/м^3 , в пять раз меньше, чем усадка бетона контрольного состава, без микрокремнезема. С увеличением содержания микрокремнезема до 142 кг/м^3 усадочные деформации не увеличиваются [92].

По данным С.С. Каприелова [93] введение добавки МБ-01 значительно снижает усадку бетона, повышает усадочную трещиностойкость и способствует увеличению долговечности в агрессивных средах.

В исследованиях Ф.А. Иссерса, М.Г. Булгаковой и Н.И. Вершининой [94] показано, что модификатор МБ 10-01 в составе высокопрочного бетона существенно снижает деформации влажностной усадки. Так усадочные деформации бетона с МБ 10-01 составили $16,5 \cdot 10^{-5}$, что на 36% ниже по сравнению с усадкой контрольного бетона, достигающей $22,5 \cdot 10^{-5}$ [94].

Данные А.Г. Ольгинского [95] свидетельствуют, что тонкодисперсные пылевидные наполнители (гранит, песчаник, известняк) понижают усадку бетона в среднем на 15-25%. Объясняется это более плотной структурой цементных бетонов с наполнителем.

По зарубежным данным [96] значения усадочных деформаций бетона, приготовленного с добавкой молотого доменного шлака, близки усадке обычного бетона, без добавки.

По данным [97] особо тяжелые высокопрочные бетоны, изготовленные с комплексным использованием отходов стекла в качестве заполнителя имеют чрезвычайно низкую усадку, не превышающую 0,15 мм/м. Полная усадка таких бетонов в жестких условиях сушки при 105°C до удаления всей адсорбционно - связанной воды не превышала 0,3 мм/м, что определяет этот вид бетона, как малоусадочный и имеющий высокую трещиностойкость.

В работе С.В. Сороканича [98] в состав тяжелого бетона вводили органоминеральный модификатор, содержащий молотое стекло с сульфатом натрия в качестве активатора и суперпластификатор СП-1 и в результате модифицированный бетон имел повышенные эксплуатационные характеристики, помимо повышения коррозионной стойкости снижались усадочные деформации на 28-49% по сравнению с контрольным составом без модификатора.

1.5 Теоретическое обоснование комплексных добавок, снижающих усадку бетона. Научная гипотеза исследования

Тенденция современного производства добавок заключается в обеспечении их многофункциональности. Применение комплексных добавок является самым простым способом получения полифункционального эффекта и позволяет полностью реализовать потенциал всех компонентов [99].

Для снижения деформаций усадки расширяющие компоненты вводят в состав комплексных добавок [100].

Известно, что основой специфики твердения расширяющих добавок в среде портландцемента является образование этtringита в начальный период твердения (первые 3-7 суток). Тем не менее, механизм расширения цементного камня пока не получил однозначного объяснения и до сих пор является предметом дискуссий.

Исследователи К.Г. Красильников [62], Т.В. Кузнецова [14], Г.П. Сиверцев [101], В.Б. Ратинов [102], А.Е. Шейкин [39] и ряд других в качестве основных физических факторов механизма расширения цементного камня выделяли два – кристаллизационное и осмотическое давление. По мнению ученых, этtringит образует вокруг гидратирующихся цементных зерен тонкие оболочки, способные создавать высокие разности концентраций растворов в зоне перехода и капиллярном пространстве, благодаря чему возникает большое осмотическое давление. При отсутствии гипса или недостаточном его количестве вокруг гидратирующихся цементных зерен образуются рыхлые оболочки, состоящие преимущественно из гидросиликатов кальция, при таких оболочках осмотическое давление не может достичь большой величины.

Положительным моментом в теории осмотического давления [23, 103] является тот факт, что отмечаемая способность геля поглощать жидкость из зоны перехода, выравнивая ее концентрацию, действительно может приводить к созданию осмотического давления. Было показано, что в присутствии электролитов объемные изменения коллоидных частиц определяются не только

величиной осмотического давления, но и толщиной диффузионного слоя коллоидных частиц, которая, в свою очередь, зависит от величины электрокинетического потенциала. Необходимым условием расширения структуры гидросульфоалюмината кальция является совпадение во времени процесса образования частиц коллоидных размеров с достаточной концентрацией их и более крупных частиц в единице объема. При этом процесс образования положительно заряженных продуктов гидратации по времени должен совпасть с процессом структурообразования системы. Есть мнение, что гидросиликаты кальция имеют отрицательный заряд, что и определяет их усадку, а гидроалюминаты кальция, гидросульфоалюминат кальция трехсульфатной формы, гидроксид кальция и гипс заряжены положительно, что и обуславливает их расширение.

В работах [14, 104, 105] содержится утверждение, что расширение цементного камня является следствием интенсивного роста кристаллов этtringита в определенный период развития кристаллизационной структуры твердеющего цементного камня. Рост кристаллов расширяющего компонента должен достичь максимума в совершенно определенный отрезок времени, именно тогда, когда в цементном камне закристаллизовавшихся участков достаточно много для того, чтобы растущие кристаллы могли их раздвигать и вызывать расширение. При быстром образовании гидросульфоалюмината кальция (при тонком измельчении расширяющей добавки), когда камень еще не приобрел достаточной жесткости, расширения не происходит. При продолжительном росте кристаллов этtringита наблюдается большое расширение. Если количественно увеличить добавку гипса к обычному цементу, то последние порции гипса будут связываться в цементе не сразу, а в достаточно отдаленные сроки, когда структура цементного камня приобретет высокую прочность. Однако, рост кристаллов структуры цементного камня вызовет не только расширение, но и разрушение камня. Именно ускоренным ростом кристаллов этtringита по сравнению с ростом кристаллов других гидратных новообразований объясняется тот факт, что при образовании

гидросульфоалюмината кальция цементный камень расширяется. Согласно этому объяснению, расширение и разрушение цементного камня вызывают силы кристаллизационного давления в процессе роста кристаллов этtringита.

В России также нашли применение расширяющие добавки разных видов [9, 106-108]. В частности, разработан и применяется на отдельных объектах комплексный органо-минеральный модификатор Эмбэлит.

Для создания комплексных добавок, требуемых технических характеристик, структурным подразделением НИИЖБ им. А.А. Гвоздева ОАО «НИЦ Строительство» введен национальный стандарт ГОСТ Р 56178-2014 «Модификаторы органо-минеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия» [109]. Добавки серии «МБ» (типа «Эмбэлит»), содержат различные активные минеральные добавки (микрокремнезем или метакаолин, золу рисовой шелухи и т.д) и органическую часть, включающую суперпластификатор и стабилизаторы, например, ФОК-2 (нитрилотриметиленфосфовую кислоту), с дополнительным введением гипса, воздухововлекающих или других добавок в различных сочетаниях и дозировках [107, 110-114]. Применение таких добавок, в зависимости от сочетания компонентов, позволяет получать высокоподвижные, нерасслаивающиеся бетонные смеси и бетоны с высокой ранней и марочной прочностью, водонепроницаемостью и долговечностью при компенсации усадки.

Кроме добавок серии «МБ» на строительном рынке предлагается большое количество других органо-минеральных добавок, включающие активные минеральные добавки и суперпластификаторы [113, 115, 116].

Одной из наиболее часто применяемых активных минеральных добавок в комплексных модификаторах является микрокремнезем, который представляет собой аморфный диоксид кремния (SiO_2) в реакционноспособном состоянии. Микрокремнезем – побочный продукт производства ферросилиция и кристаллического кремния. Получают микрокремнезем в результате возгонки кремния при температуре 1700°C , который в дальнейшем окисляется до SiO_2 и в

виде мелкодисперсной пыли улавливается рукавными фильтрами в результате очистки отходящих газов [29, 117-121].

Многие исследователи отмечают влияние добавки микрокремнезема на повышение плотности и прочности цементного камня, снижения его капиллярной пористости [29, 117-120, 122]. Это связано с тем, что микрокремнезем способствует ускорению гидратации алитовой и белитовой составляющих цемента [123]. Кроме этого, при введении микрокремнезема в жидкой фазе цементного теста образуется гель оксида кремния, который в дальнейшем сорбирует свободные ионы Ca^{2+} и OH^- в жидкой фазе, с формированием слабозакристаллизованных низкоосновных гидросиликатов кальция. При стесненных условиях низкоосновные гидросиликаты кальция приводят к увеличению количества гелевых пор и снижению открытой пористости [111].

В своих работах большинство исследователей ограничивают дозировку микрокремнезема в бетоне не более 10%, что объясняется высокой водопотребностью добавки, необходимостью поддержания высокого рН среды бетона и сохранения в нем достаточного количества гидроксида кальция для предотвращения коррозии арматуры [29, 122-124]. Вследствие высокой водопотребности микрокремнезем следует применять только совместно с водоредуцирующими добавками [29, 123, 124].

В работах Н.М. Зайченко, А.К. Халюшева [125, 126] показана эффективность комбинирования в составах высокопрочного бетона (композиционных цементов) комплекса минеральных добавок, включающего золу-уноса, микрокремнезем, шамотно-каолиновую пыль, а также молотые доменный граншлак, шлак теплоэлектростанций, известняк. Так же определены оптимальные соотношения между минеральными добавками, на основе которых разработаны составы многокомпонентных композиционных цементов типа КЦ V/Б-400 (содержат вместо части доменного граншлака и золы-уноса шлак теплоэлектростанций, молотый известняк или пыль шамотно-каолиновую), а также композиционных

портландцементов типа ПЦ II/Б-К-500 (содержат в составе вместо части доменного граншлака молотый известняк, пыль шамотно-каолиновую или микрокремнезем).

Для стабилизации свойств и расширения области применения добавок в технологии строительных материалов все чаще используют специально полученные активные минеральные добавки, среди которых особый интерес в последнее время вызывает метакаолин, представляющий собой метастабильный продукт дегидратации каолина при температуре 650 - 850°C [118]. От других активных минеральных добавок метакаолин отличается тем, что его пуццолановая активность носит смешанный алюминатно-кремнеземистый характер [100, 118, 127-131].

Интерес к метакаолину в качестве добавки в бетоны появился еще во второй половине XX века. Исследованию влияния метакаолина на свойства цементных композиций посвящены работы многих ученых [100, 118, 127-134]. При этом до настоящего времени остаются не решенными ряд вопросов.

В этой связи перспективными для исследований являются алюмосиликатные материалы из отходов промышленности Донецкого региона. Так, при производстве шамотных огнеупоров в процессе обжига каолина на шамот во вращающихся печах образуется дисперсная алюмосиликатная пыль, которая улавливается электрофильтрами при очистке газов – шамотно-каолиновая пыль. Данный отход по своему химическому составу практически аналогичен метакаолину.

В работе А.Н. Ефремова и Н.М. Зайченко [135] исследована водопотребность смешанных вяжущих с шамотно-каолиновой пылью и метакаолином, в которой показано, что увеличение содержания обеих добавок влечет пропорциональный рост нормальной густоты теста вяжущих. Однако рост водопотребности при введении шамотно-каолиновой пыли значительно ниже, чем при добавке метакаолина, так как нормальная густота самих этих добавок составляет соответственно 37,5 и 62 % [135], что позволяет вводить шамотно-каолиновую пыль в больших количествах, чем метакаолин.

Шамотно-каолиновая пыль может служить практически полноценным аналогом метакаолину, который в ряде работ применяется в качестве

глиноземсодержащего компонента расширяющей добавки [136, 137]. Также следует учесть факт того, что шамотно-каолиновая пыль улавливается электрофильтрами, в результате чего приобретает поверхностный электрический заряд, и в следствии кулоновского взаимодействия частиц пыли с зернами портландцемента возникают электрогетерогенные контакты в твердеющей системе, что способно обеспечить формирование плотной и прочной микроструктуры цементного камня [138].

Таким образом, целесообразно для создания тяжелых бетонов с пониженной усадкой разработать расширяющие добавки из местного сырья, как альтернативу дорогостоящим фирменным зарубежным добавкам. Возможно разработать два вида расширяющих добавок: сульфоалюминатную на основе шамотно-каолиновой пыли в качестве глиноземсодержащего компонента и гипса в роли сульфатного материала, и оксидосульфоалюминатную, где к двум вышеописанным компонентам добавляется оксидный – известь.

Необходимо исследовать влияние расширяющих добавок сульфоалюминатного и оксидосульфоалюминатного типа в комплексе с микрокремнеземом и поликарбоксилатным суперпластификатором на эксплуатационные характеристики бетона. Определить дозировку расширяющих добавок и разработать комплексные добавки, позволяющие ускорять гидратацию цемента и твердение бетона, повышать плотность и долговечность бетона. Применение таких добавок позволит использовать модифицированные бетоны в различных условиях внешней среды.

На основании анализа состояния вопроса и теоретических предпосылок исследования выдвинута следующая **научная гипотеза**. Введение в состав тяжелых бетонов из подвижных смесей комплексных модификаторов на основе расширяющих добавок, состоящих из шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести способствует формированию повышенного количества гидросульфоалюмината кальция, а также дополнительному образованию гидроксида кальция, которые вызовут расширение системы в раннем возрасте, что позволит снизить усадочные деформации, а в последствие также повлияет на снижение общей влажностной усадки и повысит эксплуатационные свойства тяжелых бетонов.

Выводы по разделу 1

1. На основании анализа литературных источников показано, что наиболее эффективным способом минимизации трещинообразования в цементобетонных конструкциях вследствие усадки является применение бетонов с пониженной усадкой. Это достигается за счет использования разнообразных материалов, таких как добавки, снижающие усадку, расширяющиеся цементы или расширяющие добавки и прочее.

2. Разработка расширяющих добавок сульфоалюминатного и оксидосульфоалюминатного типов на основе местного техногенного сырья является перспективным направлением в условиях строительной промышленности Донбасса. Во-первых, это позволит создавать цементные бетоны с высокими эксплуатационными свойствами, а также с пониженной усадкой, во-вторых, добавление промышленных отходов в добавки улучшит экологическую ситуацию в регионе, в-третьих вовлечение расширяющих добавок из местного сырья экономически выгоднее в сравнении с применением дорогостоящих зарубежных добавок.

3. На основании анализа состояния вопроса и теоретических предпосылок исследования выдвинута следующая **научная гипотеза**: Введение в состав тяжелых бетонов из подвижных смесей комплексных модификаторов на основе расширяющих добавок, состоящих из шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести способствует формированию повышенного количества гидросульфоалюмината кальция, а также дополнительному образованию гидроксида кальция, которые вызовут расширение системы в раннем возрасте, что позволит снизить усадочные деформации, а в последствие также повлияет на снижение общей влажностной усадки и повысит эксплуатационные свойства тяжелых бетонов.

РАЗДЕЛ 2

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Характеристика исходных сырьевых материалов, использованных в экспериментальных исследованиях

Для выполнения программы экспериментальных исследований использовали следующие исходные компоненты бетона: вяжущие, заполнители, химические модификаторы и дисперсные минеральные добавки.

В качестве вяжущего материала принят портландцемент типа ЦЕМ I 42,5Н производства ОАО "Новоросцемент" (г. Новороссийск, РФ), отвечающий требованиям ГОСТ 31108-2016 "Цементы общестроительные. Технические условия". Химико-минералогический состав цемента согласно заводских данных представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Химико-минералогический состав портландцемента

Химический состав, %							Минералогический состав клинкера, %			
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	ППП	C ₃ S	β-C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
20,16	4,72	4,05	64,33	1,08	3,01	1,33	67,35	11,16	5,25	12,93

Физико-механические свойства портландцемента представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Физико-механические свойства портландцемента

Марка портландцемента	Остаток на сите 008, %	Удельная поверхность, м ² /кг	Нормальная густота, %	Сроки схватывания, час-мин.		Активность цемента, МПа
				начало	конец	
M500	5,3	350	26,2	3-09	4-22	52,7

В качестве мелкого заполнителя применяли природные кварцевые пески Лутугинского песчаного карьера Луганской области (ГОСТ 8736-2014 "Песок для строительных работ. Технические условия").

Крупный заполнитель представлен щебнем Торезского карьера Донецкой области с содержанием зерен игловатой формы 12,5 % (ГОСТ 8267-93 "Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия").

Физико-механические свойства заполнителей представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Физико-механические свойства заполнителей бетонных смесей

Наименование материала	Зерновой состав	Насыпная плотность, кг/м ³	Истинная плотность, кг/м ³	Пустотность, %	Дробимость зерен в цилиндре, % (марка щебня по дробимости)
Песок кварцевый	M _к =1,35	1450	2650	45,3	-
Щебень	Смесь фракций 5-20 мм	1410	2680	47,4	11,6 (1000)

Для регулирования свойств цементного теста, бетонных смесей и бетонов приняты следующие химические добавки: суперпластификатор "MasterGlenium 115" на основе эфира поликарбоксилата и добавка, снижающая усадку бетона "Маресиге SRA". Технические характеристики применяемых химических добавок приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Технические характеристики химических добавок

Наименование добавки, производитель	Основной эффект действия	Вещественный состав	Физическое состояние	Плотность, г/см ³	Рекомендованный расход, % от массы цемента
MasterGlenium 115, BASF, Германия	Суперпластификатор (водопонижитель)	Эфир поликарбоната	Жидкость светло-желтого цвета	1,05...1,09	0,2...2,0
Маресуре SRA, Marei, Италия	Добавка, снижающая усадку	Полипропиленгликолиевый полимер	Бесцветная жидкость	0,8...0,9	1,0...2,0

В качестве активной минеральной добавки применен микрокремнезем Стахановского завода ферросплавов с насыпной плотностью 620 кг/м³. Химический состав микрокремнезема представлен в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Химический состав микрокремнезема

Содержание оксидов, %							ППП, %
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	
82,8	1,6	3,0	1,1	0,2	0,6	3,6	7,1

Расширяющая добавка представлена смесью шамотно-каолиновой пыли и гипса (сульфоалюминатная – СА) или шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести (оксидосульфоалюминатная – ОСА). В качестве алюминатного компонента расширяющей добавки, содержащей глинозем принята шамотно-каолиновая пыль, которая образуется как побочный продукт при обжиге каолина Владимировского месторождения во вращающихся печах ЧАО "Великоанадольский огнеупорный комбинат" (пос. Владимировка, Донецкая область). Химический состав и свойства шамотно-каолиновой пыли представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6

Химический состав и свойства шамотно-каолиновой пыли

Содержание оксидов, %							ППП, %	Насыпная плотность, кг/м ³	Удельная поверхность, м ² /кг
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃			
51,0	37,3	1,05	0,31	0,16	0,15	0,05	2,5	450-700	400-500

Сульфатным компонентом расширяющей добавки является двуводный гипс по ГОСТ 4013-2019 "Камень гипсовый и гипсоангидритовый для производства вяжущих материалов. Технические условия". Оксидным компонентом принята известь, соответствующая ГОСТ 9179-2018 "Известь строительная. Технические условия".

В качестве контрольного расширяющего компонента применяли порошкообразную расширяющую добавку "Expancrete" производства итальянской фирмы "Mapei".

2.2 Методы, принятые для исследований

Подготовку сырьевых материалов (сушку и помол) осуществляли с использованием стандартного лабораторного оборудования. Физико-механические свойства вяжущих, заполнителей, минеральных добавок, цементного теста, бетонных смесей и бетонов определяли по стандартным методикам.

Реологические свойства модифицированного цементного теста – подвижность и потери подвижности во времени, определяли по диаметру расплыва теста с помощью прибора Сутгарда (рисунок 2.1).



Рис. 2.1. Определение диаметра расплыва цементного теста

Подвижность бетонных смесей определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 10181-2014 "Смеси бетонные. Методы испытаний" (рисунок 2.2).

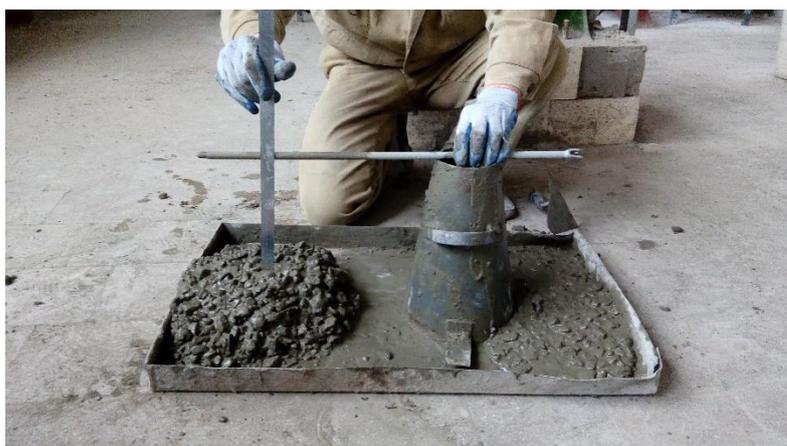


Рис. 2.2. Определение подвижности бетонных смесей

Предел прочности при сжатии цементного камня и бетонных образцов определяли в соответствии с ГОСТ 10180-2012 "Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам". Прочностные показатели цементного камня определяли на образцах-кубах с размером ребра 0,03 м в возрасте 3, 7, 14 и 28 суток, бетонных образцов – с размером ребра 0,1 м в возрасте 7, 28, 90 суток. Образцы твердели в нормальных условиях при температуре $20\pm 2^\circ\text{C}$.

Деформации усадки измеряли на призматических образцах 0,1x0,1x0,4 м в соответствии с ГОСТ 24544-81 "Бетоны. Методы определения деформации усадки и ползучести" (рисунок 2.3).

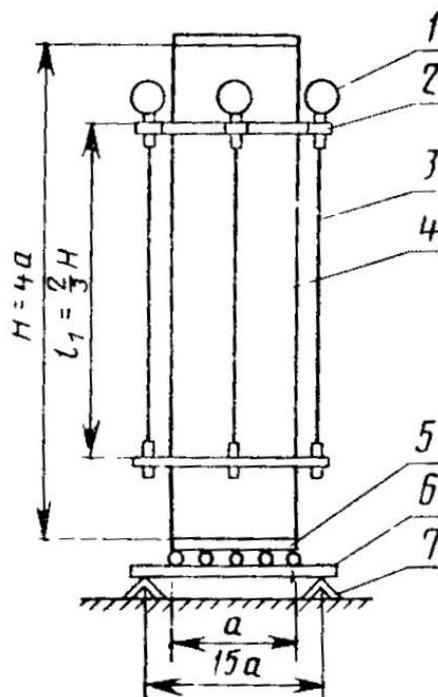


Рис. 2.3. Схема устройства для определения деформаций усадки образцов с размерами поперечного сечения более 40×40 мм [139]:

1 – индикатор часового типа; 2 – рамка для крепления индикаторов; 3 – качающаяся штанга; 4 – образец; 5 – металлические пластинки по торцам образца; 6 – плоская сварная сетка; 7 – опора; a – размер стороны поперечного сечения образца; H – высота образца; l_1 – база измерений.

Морозостойкость бетонных образцов определяли в проектном возрасте в соответствии с ГОСТ 10060-2012 "Бетоны. Методы определения морозостойкости" вторым ускоренным методом.

Показатели водонепроницаемости определяли согласно ГОСТ 12730.5-84 "Бетоны. Методы определения водонепроницаемости" на образцах-цилиндрах диаметром 0,15 м, высотой 0,10 м.

Состав продуктов гидратации модифицированного цементного камня оценивали с помощью рентгенофазового анализа, выполненного на установке "Дрон-4-07" (рис. 2.4) при следующих условиях съемки дифрактограмм (одинаковые для всех образцов): медное излучение с длиной волны $\lambda=0,154178$ нм при ускоряющем напряжении 27 кВ и токе 15 мА; щели для съемки $0,5 \times 4 \times 0,25$ мм

(0,5 – вертикальная коллимационная щель; 4 – горизонтальная коллимационная щель; 0,25 – щель на детекторе). Съемка дифрактограмм осуществлялась в пошаговом режиме ($2\theta=10-80^\circ$ шагом $0,1^\circ$ и временем экспозиции 5 с).

Расшифровку рентгенограмм осуществляли в соответствии с [140-142].



Рис. 2.4. Дифрактометр рентгеновский общего назначения "ДРОН 4-07"

Оптимизацию составов бетона выполняли с применением метода математического планирования эксперимента (ПФЭ 2^k). Статистический анализ и обработку полученных результатов выполняли на основе статистических моделей в соответствии с [143, 144]. Графическую интерпретацию уравнений выполняли с использованием программного комплекса "MathCAD for Windows".

Выводы по разделу 2

1. Для проведения экспериментальных исследований в качестве вяжущего вещества использовался портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 42,5Н производства ОАО «Новоросцемент». Крупным заполнителем служил гранитный щебень (Щ) фракции 5-20 мм. Мелким заполнителем был представлен кварцевый песок (П) Лутугинского песчаного карьера с модулем крупности $M_{кр}=1,35$. Промышленный отход Стахановского завода ферросплавов – микрокремнезем (МК) использовался в качестве активного наполнителя.

2. В качестве контрольной расширяющей добавки принята порошковая добавка "Expancrete" (Exp) производства итальянской фирмы "Mapei". Сырьем для экспериментальных расширяющих добавок были: шамотно-каолиновая пыль – алюмосиликатный отход промышленности (содержание SiO_2 до 55% и Al_2O_3 до 40%), образующийся при обжиге каолина во вращающихся печах ЧАО «Великоанадольский огнеупорный комбинат» (пос. Владимировка, Донецкая область); строительный гипс; известь. Расширяющую добавку сульфоалюминатного типа (СА) изготавливали путем смешивания шамотно-каолиновой пыли и гипса, а оксидосульфоалюминатного типа (ОСА) – шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести.

3. В качестве химических добавок были приняты: суперпластификатор (СП) на основе поликарбонатного эфира "MasterGlenium 115" производства немецкого концерна BASF, который представляет собой раствор плотностью 1,05-1,09 кг/л; добавка, снижающая усадку бетонов, на основе этиленгликолевого полимера "Mapecure SRA" производства фирмы Mapei, раствор плотностью 0,9 кг/л.

4. При проведении экспериментальных исследований использовались стандартные методы исследований. Структурообразование и состав продуктов гидратации модифицированных цементных композитов с помощью современных методов анализа рентгеновской дифрактометрии.

РАЗДЕЛ 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНОВ

В цементном камне и бетоне, начиная с момента схватывания и в процессе твердения происходят деформации элементов структуры, приводящие к формированию поля собственных напряжений. В большинстве случаев это связано с гидратацией клинкерных материалов и образованием комплексных соединений, абсорбцией и десорбцией воды, температурными деформациями и фазовыми превращениями, такими как, процессы растворения и кристаллизация солей.

Цементный камень и бетоны на портландцементе при твердении в воздушной среде подвергаются усадочным деформациям, приводящим к повышению внутрискруктурных напряжений и, при определенных условиях, к возникновению микротрещин. Для влияния на собственные деформации целесообразно применять в качестве модификатора в бетонах расширяющие добавки, при использовании которых можно добиться улучшения структурных характеристик бетонов, снижения усадочных деформаций, повышения темпов нарастания прочности, увеличения показателей водонепроницаемости и долговечности, что в конечном итоге даст возможность качественно улучшить строительных конструкций [21].

3.1 Влияние сульфоалюминатной расширяющей добавки на свойства цементного теста и цементного камня

Для определения реологических свойств модифицированного цементного теста использовали вискозиметр Сутгарда, с помощью которого оценивали изменение текучести смеси и ее потерю во времени по величине расплыва цементного теста.

Для экспериментальных исследований цементного теста были приняты четыре варианта составов (с введением добавки, снижающей усадку SRA и без неё):

- 1) (ПЦ+МК+Ехр)+(В+СП);
- 2) (ПЦ+МК+ СА)+(В+СП);
- 3) (ПЦ+МК+ Ехр)+(В+СП+SRA);
- 4) (ПЦ+МК+ СА)+(В+СП+SRA).

Кроме того, в указанных составах сульфоалюминатная расширяющая добавка – СА вводится в количестве 5, 10, 15% от массы цемента. Дозировка фирменной добавки "Ехрancrete" принята в соответствии с рекомендациями производителей.

При проведении исследования по сохраняемости текучести цементного теста во времени и изучения кинетики твердения цементного камня использовались материалы, которые представлены во втором разделе.

Составы представлены в таблице 3.1. Водотвердое отношение принято с учетом равнозначности расплыва теста контрольных составов №1 и 2 с составами, содержащими расширяющие добавки.

Таблица 3.1

Составы цементного теста

№ состава	Компоненты цементного теста						В/Т
	ПЦ, г	МК, %	Ехр, %	СА, %	СП, %	SRA, %	
1	600	10	-	-	1,3	-	0,27
2	600	10	-	-	1,3	1,5	0,27
3	600	10	7	-	1,3	-	0,28
4	600	10	7	-	1,3	1,5	0,28
5	600	10	-	5	1,3	-	0,28
6	600	10	-	5	1,3	1,5	0,28
7	600	10	-	10	1,3	-	0,3
8	600	10	-	10	1,3	1,5	0,3
9	600	10	-	15	1,3	-	0,32
10	600	10	-	15	1,3	1,5	0,32

После замешивания цементного теста проверяли расплыв смеси по прибору Суттарда и далее тесто выдерживалось в условиях, исключающих испарение воды до следующих замеров изменения подвижности цементного теста каждые полчаса в течение 120 минут.

Из данных, представленных на рисунках 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, установлено, что начальный расплыв теста контрольного состава №1 составляет 27,5 см, через 30 минут выдерживания увеличивается до 32 см и в течение последующих 90 минут снижается до 31 см. Повышение диаметра расплыва в течение первого получаса и сохранение его до 120 минуты можно связать вероятно с поздней стабилизацией стерического эффекта поликарбоксилатного суперпластификатора "MasterGlenium 115".

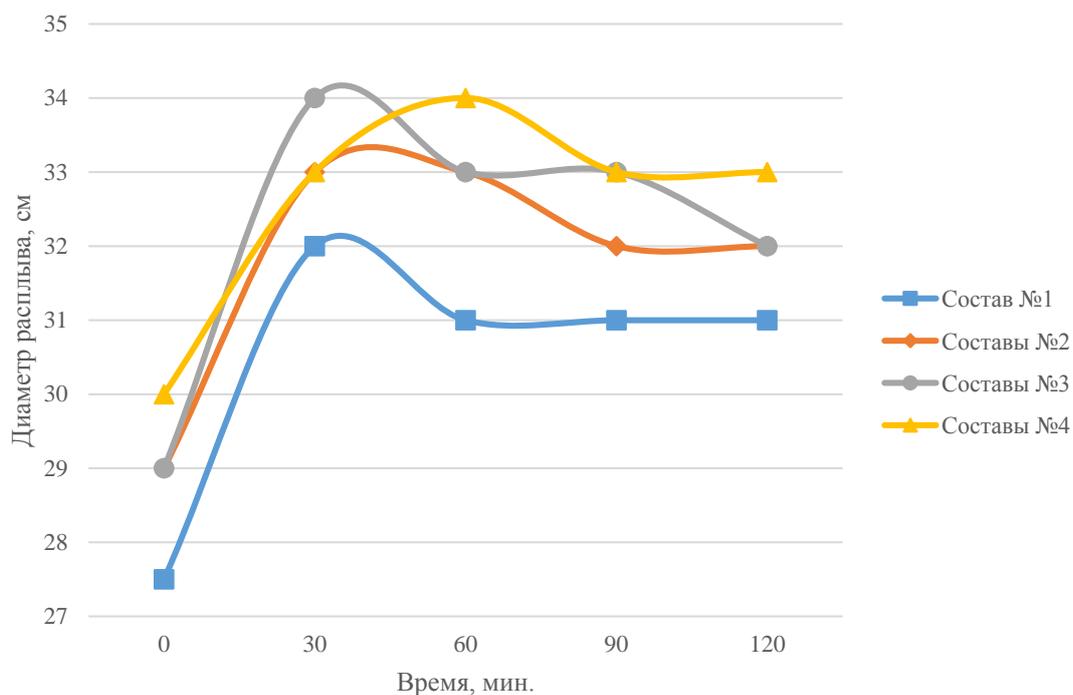


Рис. 3.1. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени (составы №1-4)

Введение жидкой химической добавки, снижающей усадку SRA (состав №2), повышает начальный расплыв теста на 5,45% ($D=29$ см), при дальнейшем выдерживании прослеживается та же тенденция увеличения диаметра расплыва в

течение часа и его сохранения до 120 минут, что и в составе №1, при этом в двухчасовой срок диаметр расплыва выше на 6,45% ($D=33$ см).

Было выявлено, что при введении в цементное тесто расширяющей добавки "Ехпанcrete" (состав №3) начальный диаметр расплыва также повышается на 5,45% ($D=29$ см), и в течение 120 минутной выдержки смеси её расплыв выше контрольного состава на 1-2 см. Введение в этот состав добавки, снижающей усадку SRA (состав №4) повышает диаметр расплыва смеси практически на всем протяжении её выдерживания на 1 см и при этом снижает скорость потери расплыва.

Можно сделать вывод, что введение в состав цементного теста добавки "Ехпанcrete" влияет на расплыв цементного теста и её сохраняемость незначительно.

Установлено, что применение расширяющей добавки СА в цементном композите (составы №5-10) в большей степени влияет на расплыв цементного теста по сравнению с контрольным составом №1 (рисунок 3.2, 3.3, 3.4).

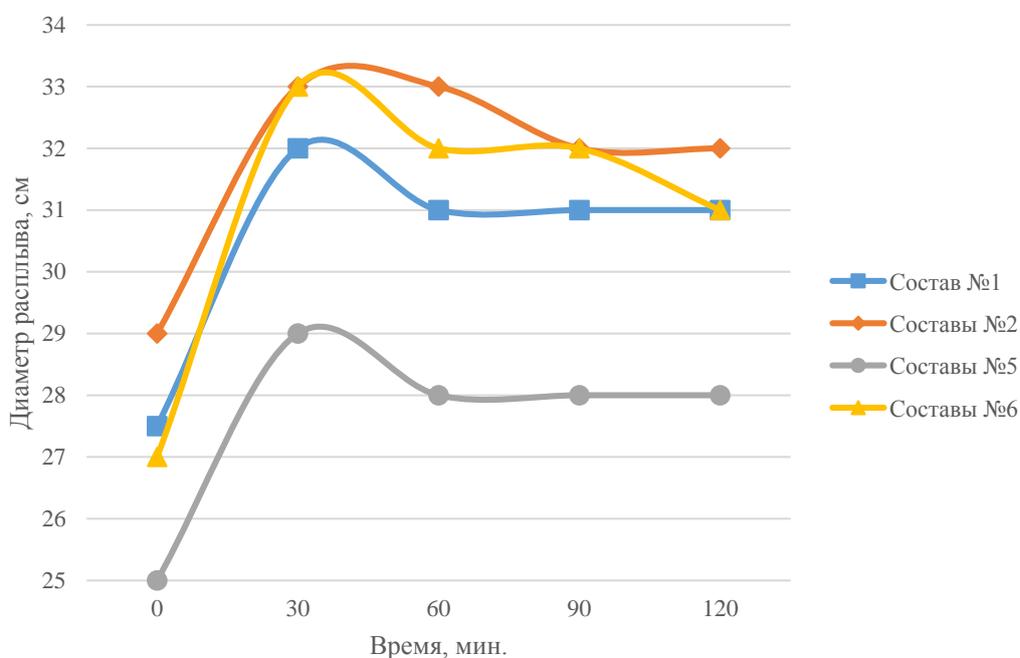


Рис. 3.2. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени (составы №1, 2, 5, 6)

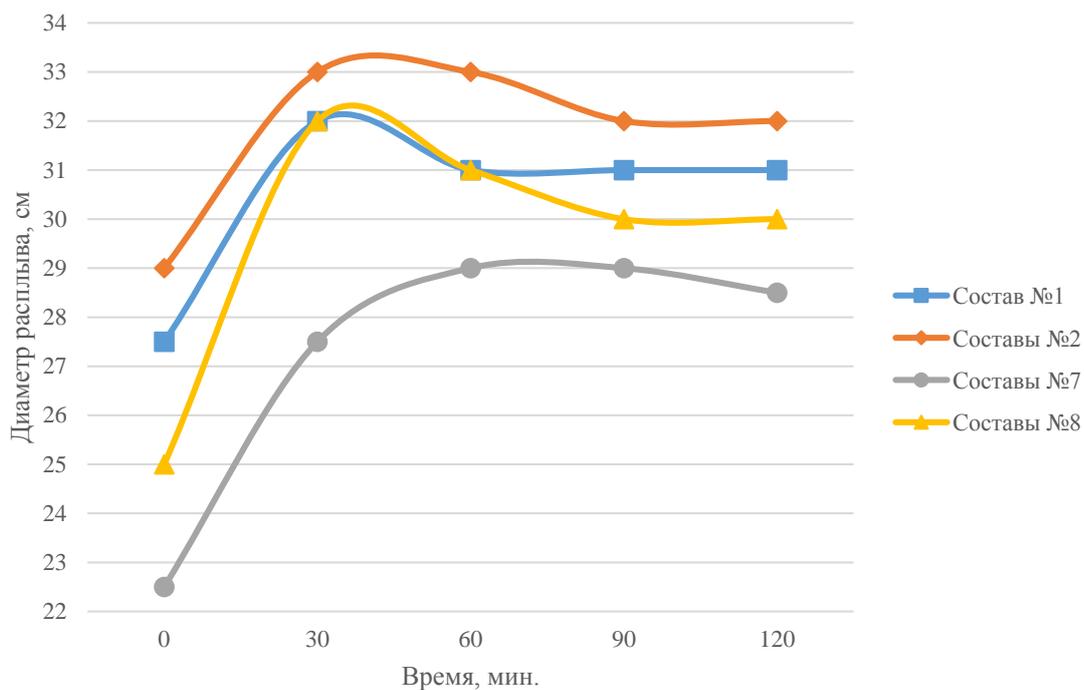


Рис. 3.3. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени
(составы №1, 2, 7, 8)

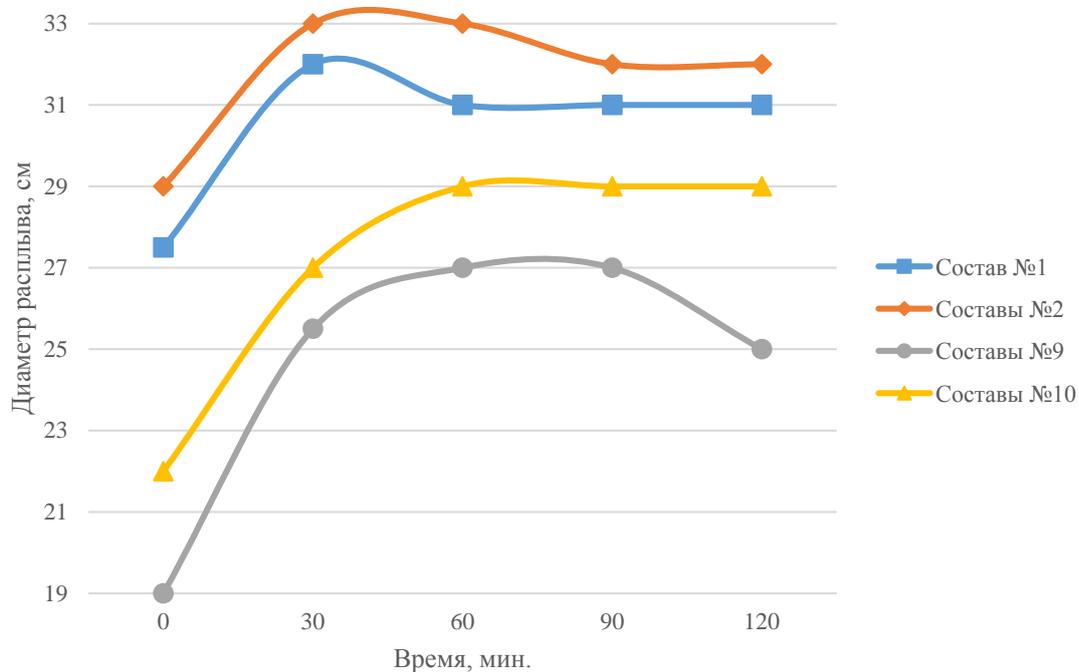


Рис. 3.4. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени
(составы №1, 2, 9, 10)

При этом, величина снижения диаметра расплыва цементного теста зависит от количества вводимой добавки: при содержании СА в количестве 5% от массы цемента (состав №5) первоначальный расплыв снижается на 9,1% (D=25 см), при 10% (состав №7) – на 18,2% (D=22,5 см), а при 15% (состав №9) до 30,9% (D=19 см). Данное явление очевидно связано с применением в качестве глиноземсодержащего компонента расширяющей добавки шамотно-каолиновой пыли, имеющую высокую водопотребность. Наблюдались те же изменения диаметра расплыва теста, характерные для состава №1, а именно повышение его в первый час выдерживания и стабилизация после 60 минут. Добавка SRA также, как и в предыдущих случаях (составы № 2, 4) показывает тенденцию к положительному влиянию на технологические свойства цементного теста. Так, начальный диаметр расплыва цементного теста состава №6, являющегося аналогом состава №5 и отличающегося наличием добавки SRA в нем, выше на 8% (D=27 см) и в дальнейшем показатели расплыва увеличиваются и к 60 минуте разница в расплыве составляет 14,28% (D=32 см), а к 120 – 10,7% (D=31 см). Данная динамика показателей расплыва сопоставима с контрольным составом №1 и в промежутке между 30 и 90 минутами выдержки диаметр расплыва выше на 3,1-3,2%. Также добавка, снижающая усадку SRA, положительно влияет и на расплыв цементного теста составов №8 и №10, являющиеся аналогами составов №7 и №9 соответственно. Так начальный диаметр расплыва повышается на 11,1% и 15,7%, а после 120 минутной выдержки на 5,26% и 16% (рисунок 3.3, 3.4). Эти данные подтверждают ранние исследования других ученых [25, 63], которые объясняли улучшение пластифицирующего эффекта при применении добавки SRA тем, что по своей природе добавка является синергетическим комплексом неионогенного ПАВ и гликоля.

Для определения влияния расширяющей добавки СА на прочностные характеристики цементного камня выполнены экспериментальные исследования на образцах, составы которых приведены в таблице 3.2. В этих составах для выбора оптимального процентного содержания добавки СА в цементном камне варьировали содержание добавки от 5 до 15%. Помимо этого, определяли

ОПТИМАЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВЕННОЕ СООТНОШЕНИЕ ШАМОТНО-КАОЛИНОВОЙ ПЫЛИ И ГИПСА ВНУТРИ ДОБАВКИ ПУТЕМ ИХ ВАРИИРОВАНИЯ В ПРЕДЕЛАХ 50:50, 60:40 И 70:30.

Таблица 3.2

Составы цементного теста

№ состава	Компоненты цементного теста				В/Г
	ПЦ, г	МК, %	СА, %	СП, %	
			ШКП:Г		
1	600	10	-	1,3	0,27
2	600	10	5	1,3	0,28
			50:50		
3	600	10	5	1,3	0,28
			60:40		
4	600	10	5	1,3	0,28
			70:30		
5	600	10	10	1,3	0,3
			50:50		
6	600	10	10	1,3	0,3
			60:40		
7	600	10	10	1,3	0,3
			70:30		
8	600	10	15	1,3	0,32
			50:50		
9	600	10	15	1,3	0,32
			60:40		
10	600	10	15	1,3	0,32
			70:30		

В таблице 3.3 представлены результаты исследований прочностных показателей образцов цементного камня.

Прочностные показатели цементного камня

№ состава	СА, %	Прочность при сжатии МПа, сут			
		3	7	14	28
1	-	55	63,3	72,8	75
2	5	47,6	58,3	68,2	74,8
3	5	49,0	60,2	69,4	77,2
4	5	52,1	63,0	73,5	79,5
5	10	49,5	59,9	67,4	73,3
6	10	50,3	65,2	71,3	78,1
7	10	48,4	64,6	79,3	90,5
8	15	47,2	55,3	62,1	72,9
9	15	46,9	57,6	69,3	78,2
10	15	44,6	56,2	74,8	80,1

Было выявлено, что введение расширяющей добавки СА в цементное тесто снижает прочность при сжатии цементного камня в возрасте 3 суток на 5,27-18,9% (составы №№2-10) по сравнению с контрольным составом №1, что может быть обусловлено негативным влиянием расширяющего компонента при совместном действии с суперпластификатором на раннее твердение.

В возрасте 7 суток нормального твердения прирост прочности наблюдается лишь у составов №6 и №7 (на 3% и 2,05%), которые вмещают 10% добавки СА при соотношении шамотно-каолиновой пыли к гипсу 60:40 и 70:30 соответственно.

Следует также отметить негативное влияние на показатели прочности при сжатии во всех возрастах количественного соотношения шамотно-каолиновой пыли к гипсу 50:50 при любой дозировке расширяющей добавки СА.

Установлено, что в проектном возрасте твердения наибольший прирост прочности по сравнению с контрольным составом №1 наблюдается у составов с соотношением шамотно-каолиновой пыли к гипсу 70:30, а именно, у состава с 5% (состав №4) расширяющей добавки СА на 2,9%, с 10% добавки (состав №7) на 20,6% и с 15% (состав №10) – 6,8%.

Результаты экспериментальных исследований дают основания считать оптимальным содержанием расширяющей добавки СА в цементном камне 10% от

массы цемента при количественном соотношении шамотно-каолиновой пыли и гипса 70:30.

Также проведены исследования прочностных показателей цементного камня контрольного образца, составов с расширяющей добавкой Expancrete и расширяющей добавкой СА при её оптимальной дозировке с введением добавки SRA (таблица 3.4).

Таблица 3.4

Составы цементного теста

№ состава	Компоненты цементного теста						В/Т
	ПЦ, г	МК, %	Exp, %	СА, %	СП, %	SRA, %	
1	600	10	-	-	1,3	-	0,27
2	600	10	-	-	1,3	1,5	0,27
3	600	10	7	-	1,3	-	0,28
4	600	10	7	-	1,3	1,5	0,28
5	600	10	-	10	1,3	-	0,3
6	600	10	-	10	1,3	1,5	0,3

Результаты экспериментальных исследований прочностных показателей образцов цементного камня представлены в таблице 3.5 и на рисунке 3.5.

Таблица 3.5

Прочностные показатели цементного камня

№ состава	Прочность при сжатии МПа, сут			
	3	7	14	28
1	55	63,3	72,8	75
2	45,6	55,6	68,1	71,5
3	50,1	65,7	76,4	87,3
4	39,8	49,8	69,3	83,7
5	48,4	64,6	79,3	90,5
6	37,9	51,9	70,7	82,3

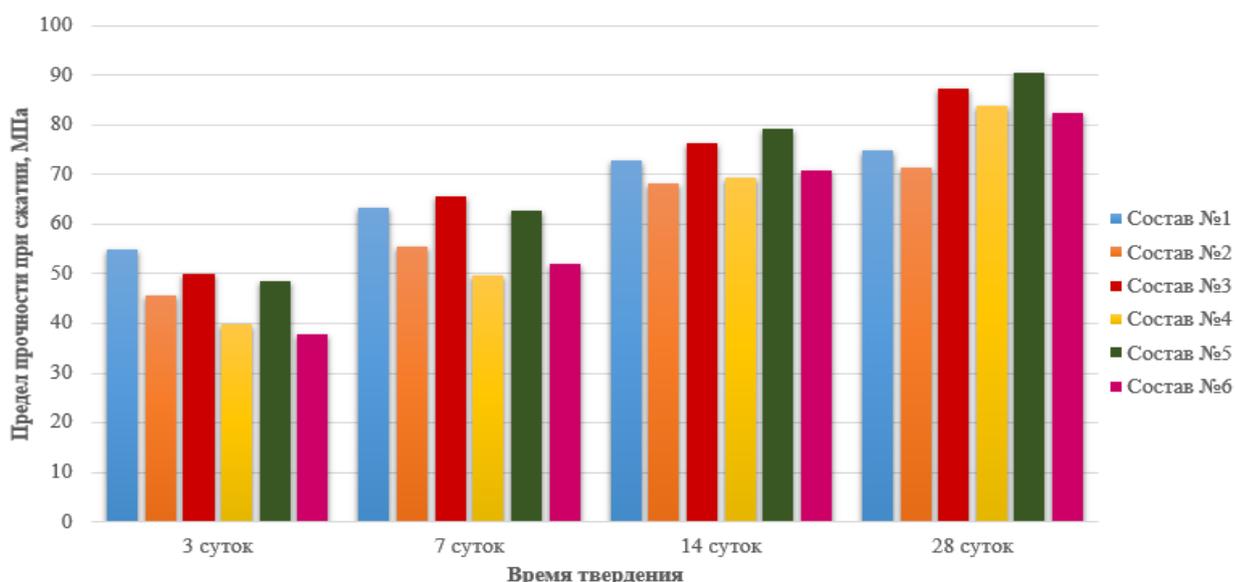


Рис. 3.5. Кинетика роста прочности при сжатии цементного камня

Установлено, что несмотря на негативное влияние расширяющих добавок на прочность при сжатии в возрасте 3 суток, цементный камень с добавкой Expancrete (состав №3) и добавкой СА (состав №5) показывает прирост прочности по сравнению с контрольным составом: в возрасте 7 суток – 3,79% и 2,05%, в возрасте 14 суток – 4,9% и 8,2% и в возрасте 28 суток – 16,4% и 20,6%. Причем, наибольшую прочность (90,5 МПа) имеет состав №5 с сульфоалюминатной расширяющей добавкой на основе шамотно-каолиновой пыли и гипса. Особенностью шамотно-каолиновой пыли является то, что при её улавливании электрофильтрами вращающихся печей она приобретает поверхностный электрический заряд и, вследствие кулоновского взаимодействия частиц пыли с зернами цемента возникают электрогетерогенные контакты в твердеющей системе, что способствует формированию более плотной и прочной микроструктуры цементного камня [138, 145].

В то же время, при введении дополнительно к составам с расширяющим компонентом добавки SRA (составы №4 и 6) наблюдается снижение прочности цементного камня по сравнению с составом №1: на 3 сутки – на 27,6% и 31,1%, в возрасте 7 суток – на 21,3% и 18% и в возрасте 14 суток – на 4,8% и 2,8%. При этом,

в возрасте 28 суток происходит прирост прочности на 11,6% (состав №4) и 9,7% (состав №6).

Также следует отметить, что добавка SRA характеризуется замедляющим эффектом при наборе прочности во всех составах по сравнению с составами аналогами без этой добавки. В раннем возрасте SRA снижает прочность на 17,1...21,7%, а в возрасте 28 суток – на 4,1...9,1%. Данное явление объясняется снижением полярности воды затворения, происходящим при применении добавки SRA, что в итоге приводит к снижению растворения и ионизации в воде затворения щелочей. Следовательно, поровая жидкость имеет меньшую концентрацию щелочных ионов, что оказывает непосредственное влияние на скорость гидратации цемента и может обуславливать замедление гидратации и твердения [80].

Подытожив вышеизложенное, следует вывод, что расширяющая добавка СА способна положительно повлиять на реологические свойства цементного теста и прочностные показатели цементного камня.

3.2 Влияние оксидносульфоалюминатной расширяющей добавки на свойства цементного теста и цементного камня

Для определения влияния расширяющей добавки ОСА на свойства цементного теста экспериментальные исследования выполнены на образцах, составы которых представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6

Составы цементного теста

№ состава	Компоненты цементного теста					В/Т
	ПЦ, г	МК, %	ОСА, %	СП, %	SRA, %	
1	600	10	-	1,3	-	0,27
2	600	10	-	1,3	1,5	0,27
3	600	10	5	1,3	-	0,28
4	600	10	5	1,3	1,5	0,28
5	600	10	10	1,3	-	0,3
6	600	10	10	1,3	1,5	0,3
7	600	10	15	1,3	-	0,32
8	600	10	15	1,3	1,5	0,32

После замешивания проверяют расплыв смеси по прибору Суттарда и далее тесто выдерживается в условиях, исключающих испарение воды, до следующих замеров изменения расплыва цементного теста каждые полчаса в течение 120 минут.

Установлено, что применение расширяющей добавки ОСА в цементном тесте (составы №3, 5, 7) несколько снижает начальный диаметр расплыва цементного теста по сравнению с контрольным составом №1 (рисунок 3.6, 3.7, 3.8).

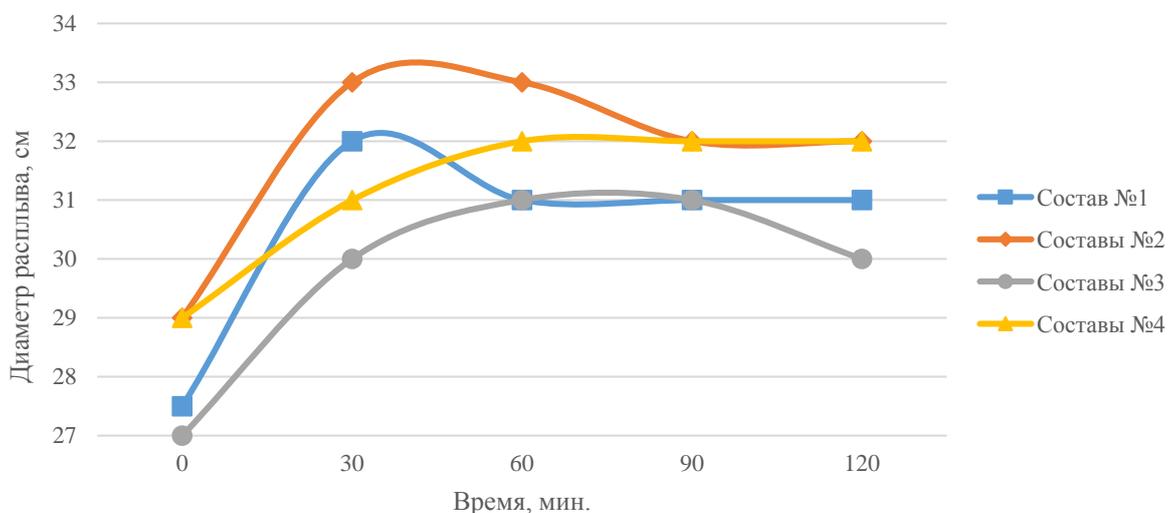


Рис. 3.6. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени (составы №1-4)

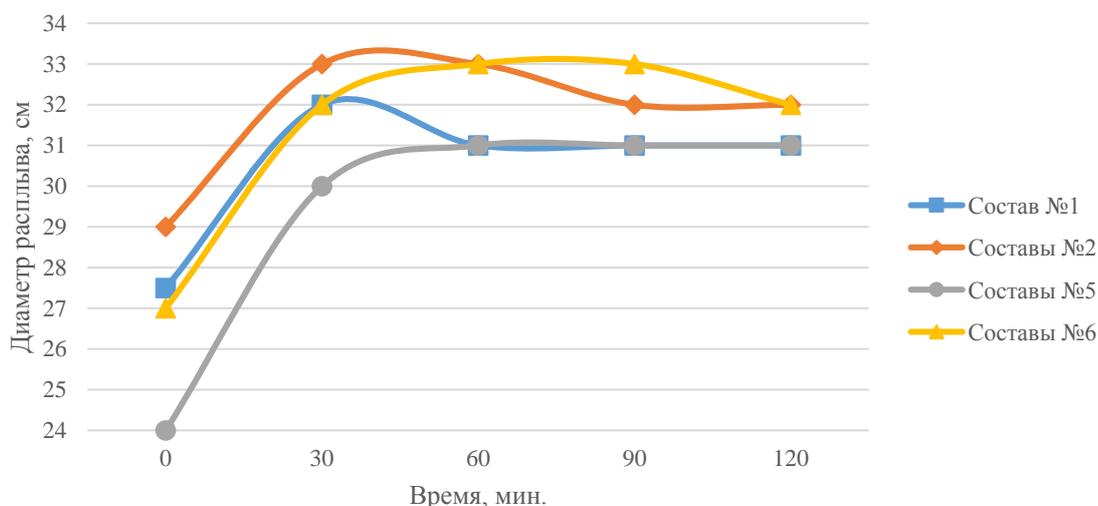


Рис. 3.7. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени (составы №1, 2, 5, 6)

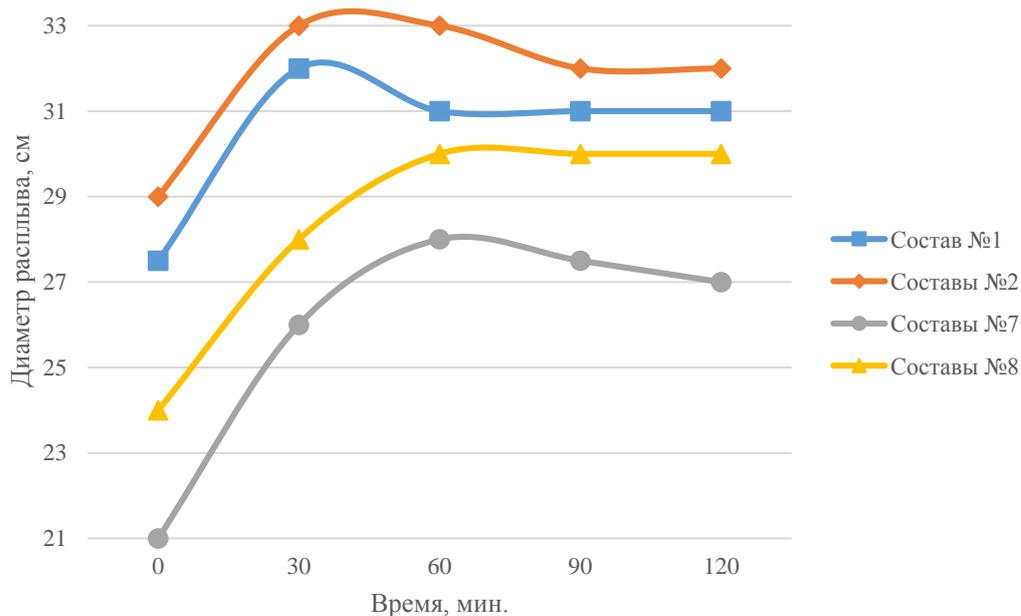


Рис. 3.8. Изменение диаметра расплыва цементного теста во времени (составы №1, 2, 7, 8)

Выявлена та же тенденция, что и при введении расширяющего компонента СА, а именно, зависимость расплыва от количества вводимой добавки: при содержании ОСА в количестве 5% от массы цемента (состав №3) первоначальный диаметр расплыва снижается на 1,82% ($D=27$ см), при 10% (состав №5) – на 12,73% ($D=24$ см), а при 15% (состав №7) до 23,64% ($D=19$ см). При этом, также как в контрольном составе №1, в составах, модифицированных расширяющими добавкам наблюдается повышение расплыва цементного теста при выдерживании его в первые 60 минут и последующая стабилизация до 120 минуты. У состава №3 повышение диаметра расплыва в течение 60 минут по сравнению с первоначальном расплывом теста составляет 14,8% ($D=31$ см), у состава №5 на 29,2% ($D=31$ см) и состава №7 – 33,3% ($D=28$ см). Динамика показателей расплыва цементного теста у составов №3 и №5 с 60 по 120 минуты аналогичны расплыву контрольного состава №1.

Введение химической добавки SRA в составы с расширяющей добавкой ОСА (составы №4, 6, 8) повышает диаметр расплыва цементного теста по сравнению с составами аналогами без этой добавки (составы №3, 5, 7). Повышение расплыва у

состава №4 на всем протяжении выдержки цементного теста составляет от 3,22 до 7,4%, состава №6 – от 3,22 до 12,5% и у состава №8 – 7,14-14,3%.

Для определения влияния расширяющей добавки ОСА на прочностные характеристики цементного камня выполнены экспериментальные исследования на образцах, составы которых приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Составы цементного теста

№ состава	Компоненты цементного теста				В/Т
	ПЦ, г	МК, %	ОСА, %	СП, %	
			ШКП:Г:И		
1	600	10	-	1,3	0,27
2	600	10	5	1,3	0,28
			45:50:5		
3	600	10	5	1,3	0,28
			55:40:5		
4	600	10	5	1,3	0,28
			65:30:5		
5	600	10	10	1,3	0,3
			45:50:5		
6	600	10	10	1,3	0,3
			55:40:5		
7	600	10	10	1,3	0,3
			65:30:5		
8	600	10	15	1,3	0,32
			45:50:5		
9	600	10	15	1,3	0,32
			55:40:5		
10	600	10	15	1,3	0,32
			65:30:5		

Для выбора оптимального процентного содержания добавки ОСА в цементном камне варьировали содержание добавки от 5 до 15%. Помимо этого, определяли оптимальное количественное соотношение шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести внутри добавки путем их варьирования в пределах 45:50:5, 55:40:5 и 65:30:5.

Результаты исследований прочностных показателей образцов цементного камня представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8

Прочностные показатели цементного камня

№ состава	ОСА, %	Прочность при сжатии МПа, сут			
		3	7	14	28
1	-	55	63,3	72,8	75
2	5	49,3	61,7	69,9	74,4
3	5	56,1	63,4	72,1	76,7
4	5	54,3	65,8	70,3	78,1
5	10	43,9	60,2	71,8	76,2
6	10	53,4	62,7	73,1	79,6
7	10	52,5	64,8	75,9	85,2
8	15	44,3	59,6	66,5	71,9
9	15	49,5	56,3	68,4	75,8
10	15	46,5	57,7	72,9	79,7

Как следует из таблицы 3.8 прочность при сжатии цементного камня в возрасте 3 суток при введение расширяющей добавки ОСА снижается на 1,27-20,2% (составы №№2, 4-10) по сравнению с контрольным составом №1, что также, как и при введении расширяющей добавки СА объясняется негативным влиянием периода развития процесса расширения.

Введение 5% расширяющей добавки незначительно влияет на прочность при сжатии на 7 и 14 сутки твердения и сопоставимо с показателями прочности контрольного состава. При этом в проектном возрасте наблюдается прирост прочности на 2,2% и 4,1% у составов №№3 и 4, в которых компоненты расширяющей добавки находятся в пределах 55:40:5 и 65:30:5 соответственно.

Установлено, что использование расширяющей добавки ОСА в количестве 10% от массы цемента (составы №5-7) при любой вариации компонентов внутри неё повышает проектную прочность цементного камня на 1,6...13,6% по сравнению с контрольным составом №1.

Введение добавки ОСА в количестве 15% способствует незначительному увеличению прочности при сжатии цементных композитов до 6,3% при соотношении компонентов расширяющей добавки 55:40:5 и 65:30:5.

Следует отметить, что, как и при использовании расширяющей добавки СА, так и при введении добавки ОСА, уменьшение количества шамотно-каолиновой пыли и увеличение количества гипса в составе добавок приводит к снижению прочности цементного камня.

По результатам экспериментальных исследований принято считать оптимальным содержанием расширяющей добавки ОСА в цементном камне 10% от массы цемента при количественном соотношении шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести 65:30:5.

Также проведены исследования прочностных показателей цементного камня на образцах контрольного состава, состава с расширяющей добавкой Expancrete и расширяющей добавкой ОСА с введением добавки, снижающей усадку SRA (таблица 3.9).

Таблица 3.9

Составы цементного теста

№ состава	Компоненты цементного теста						В/Т
	ПЦ, г	МК, %	Exp, %	ОСА, %	СП, %	SRA, %	
1	600	10	-	-	1,3	-	0,27
2	600	10	-	-	1,3	1,5	0,27
3	600	10	7	-	1,3	-	0,28
4	600	10	7	-	1,3	1,5	0,28
5	600	10	-	10	1,3	-	0,3
6	600	10	-	10	1,3	1,5	0,3

Результаты экспериментальных исследований прочностных показателей образцов цементного камня представлены в таблице 3.10 и на рисунке 3.9.

Таблица 3.10

Прочностные показатели цементного камня

№ состава	Прочность при сжатии МПа, сут			
	3	7	14	28
1	55	63,3	72,8	75
2	45,6	55,6	68,1	71,5
3	50,1	65,7	76,4	87,3
4	39,8	49,8	69,3	83,7
5	52,5	64,8	75,9	85,2
6	40,3	53,1	69,2	76,5

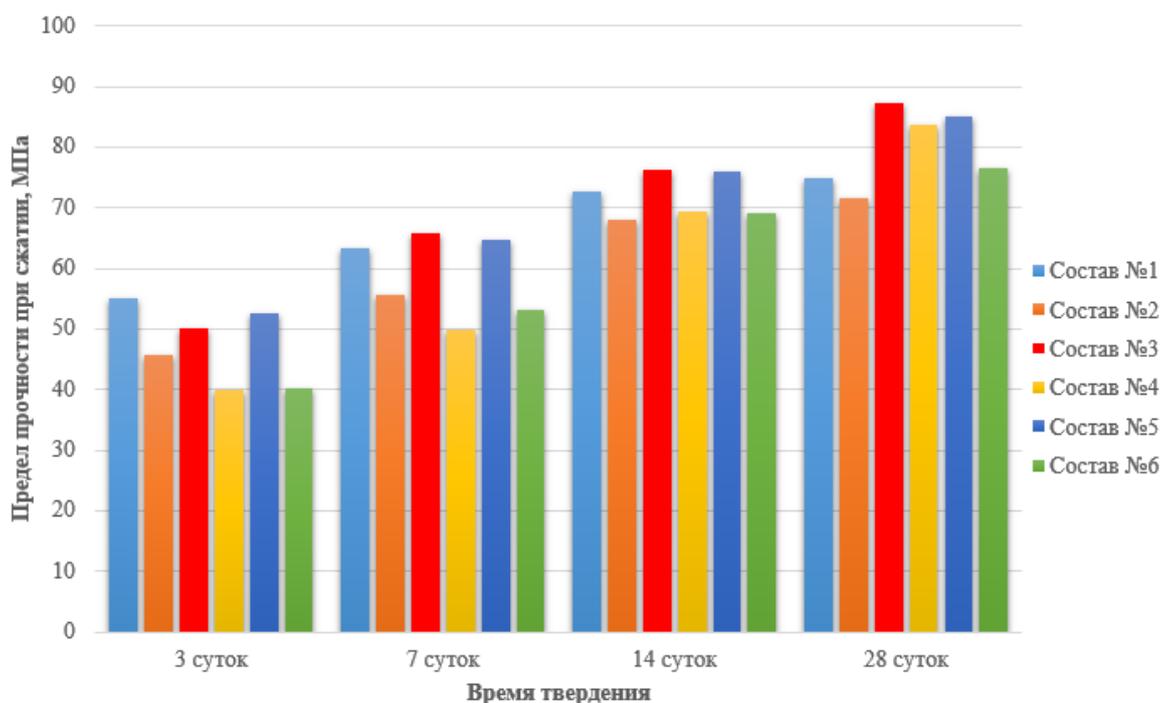


Рис. 3.9. Кинетика роста прочности при сжатии цементного камня

Образцы цементного камня с расширяющей добавкой ОСА имеют те же тенденции, что и с добавкой СА:

- снижение ранней прочности на 4,5% по сравнению с контрольным составом №1;

- прирост прочности на 7, 14 и 28 сутки по сравнению с составом №1 на 2,4%, 4,25% и 13,6%;

- введение добавки, снижающей усадку – SRA, негативно сказывается на прочности при сжатии в течении 14 суток и повышается на 2-7% в проектном возрасте по сравнению с контрольными составами №1 и 2.

Также отмечается небольшое снижение прочности состава с ОА по сравнению с "Ехpancrete" на 0,65-2,4% в течении 7-28 суток.

Можно сделать вывод, что использование расширяющей добавки ОА положительно влияет на реологические свойства цементного теста и прочностные характеристики цементного камня.

3.3 Влияние разработанных модификаторов на фазовый состав цементного камня

Для исследований процессов гидратации были приняты: контрольный состав (состав №1, таблица 3.4), состав с расширяющим фирменным компонентом "Ехpancrete" (состав №3, таблица 3.4) и модифицированные составы с наилучшими показателями прочности, а именно: состав с содержанием сульфоалюминатной расширяющей добавки (состав №5, таблица 3.4), с оксидосульфоалюминатной расширяющей добавкой (состав №5, таблица 3.9).

Составы растворов для изготовления образцов цементного камня для рентгенофазового анализа приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11

Составы цементного камня для рентгенофазового анализа

Наименование компонента	Ед. изм.	Составы, №			
		1	2	3	4
Портландцемент	г	600	600	600	600
Микрокремнезем	%	10	10	10	10
Суперпластификатор	%	1,3	1,3	1,3	1,3
"Ехpancrete"	%	-	7	-	-
Добавка СА	%	-	-	10	-
Добавка ОСА	%	-	-	-	10
В/Т	-	0,27	0,28	0,3	0,3

По данным рентгенофазового анализа для цементного камня с добавкой расширяющего компонента (составы №2-4) и контрольного состава №1, твердевших в течение 3 суток, отмечены изменения в интенсивности дифракционных отражений минерала алита: повышение интенсивностей линий $d=0,277$; $0,232$; $0,176$; $0,164$; $0,149$ нм (рисунок 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, таблица 3.12), которые характеризуют степень гидратации портландцемента.

Вместе с этим наблюдается снижение/повышение дифракционных отражений минерала портландита: $d=0,179$; $0,169$ / $0,493$; $0,263$; $0,193$ нм по сравнению с контрольным составом №1. Снижение пиков портландита может объясняться связыванием его с силикатными составляющими и переходом в гидросиликаты кальция разной основности. Помимо этого, повышению дифракционных отражений C-S-H ($d=0,307$; $0,247$; $0,199$; $0,140$ нм) способствует не только наличие активной минеральной добавки микрокремнезема, но и силикатные частички алюмосиликатного компонента – шамотно-каолиновой пыли.

Отмечено повышение интенсивности дифракционных отражений, присущих гидроалюминату кальция кубической сингонии типа C_3AH_6 ($d=0,281$; $0,230$; $0,204$ нм) в составах цементных композитов с расширяющими добавками, что связано с присутствием алюминатных компонентов внутри них.

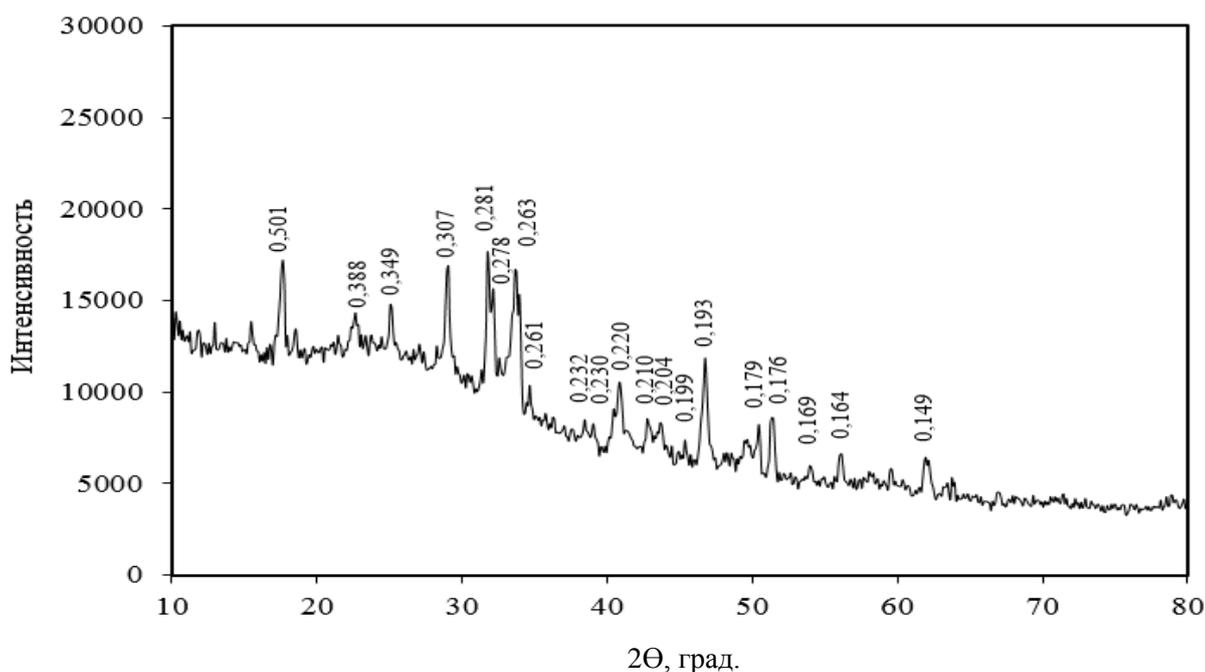


Рисунок 3.10. Рентгенограмма образца камня вяжущего № 1 в возрасте 3 суток

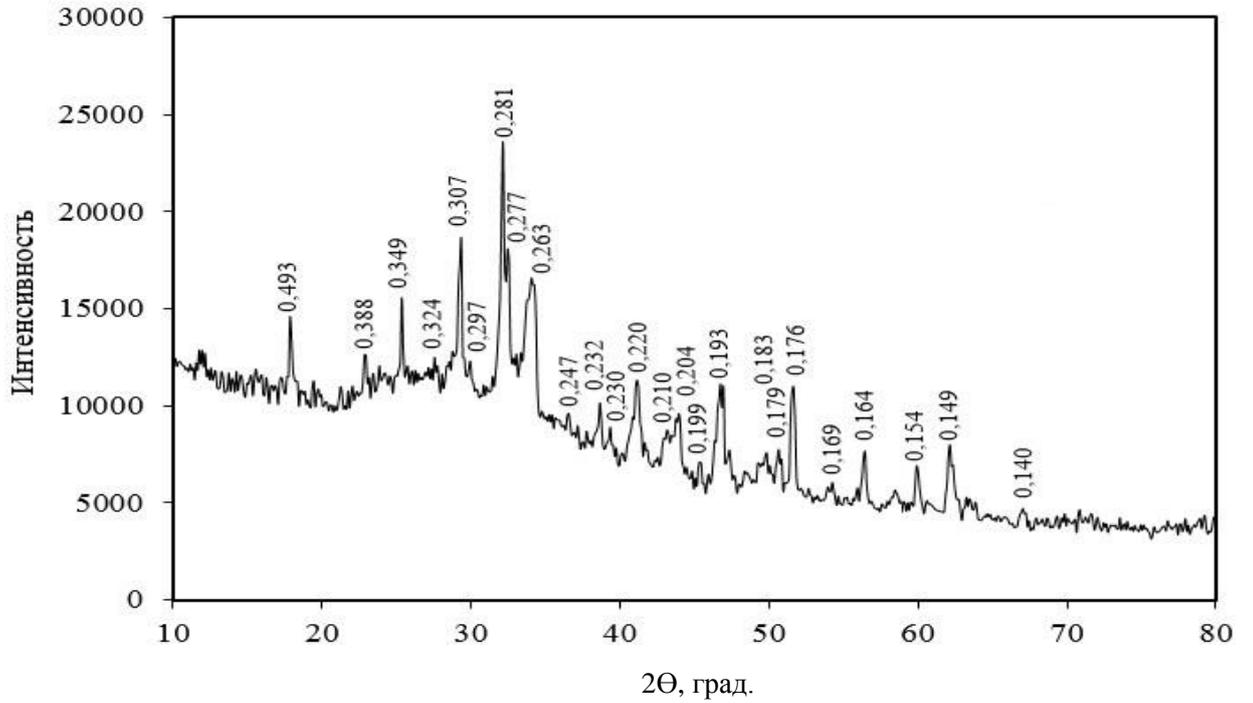


Рисунок 3.11. Рентгенограмма образца камня вяжущего состава № 2 в возрасте 3 суток

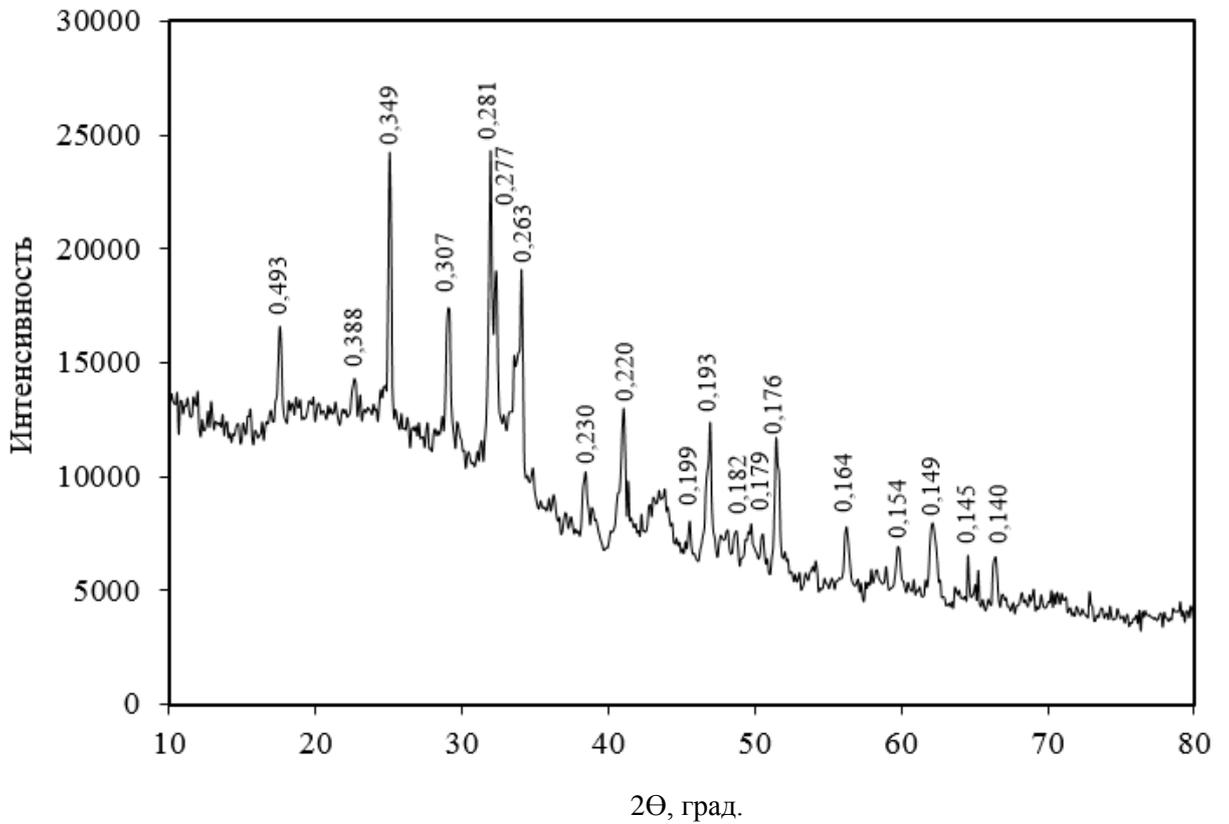


Рисунок 3.12. Рентгенограмма образца камня вяжущего состава № 3 в возрасте 3 суток

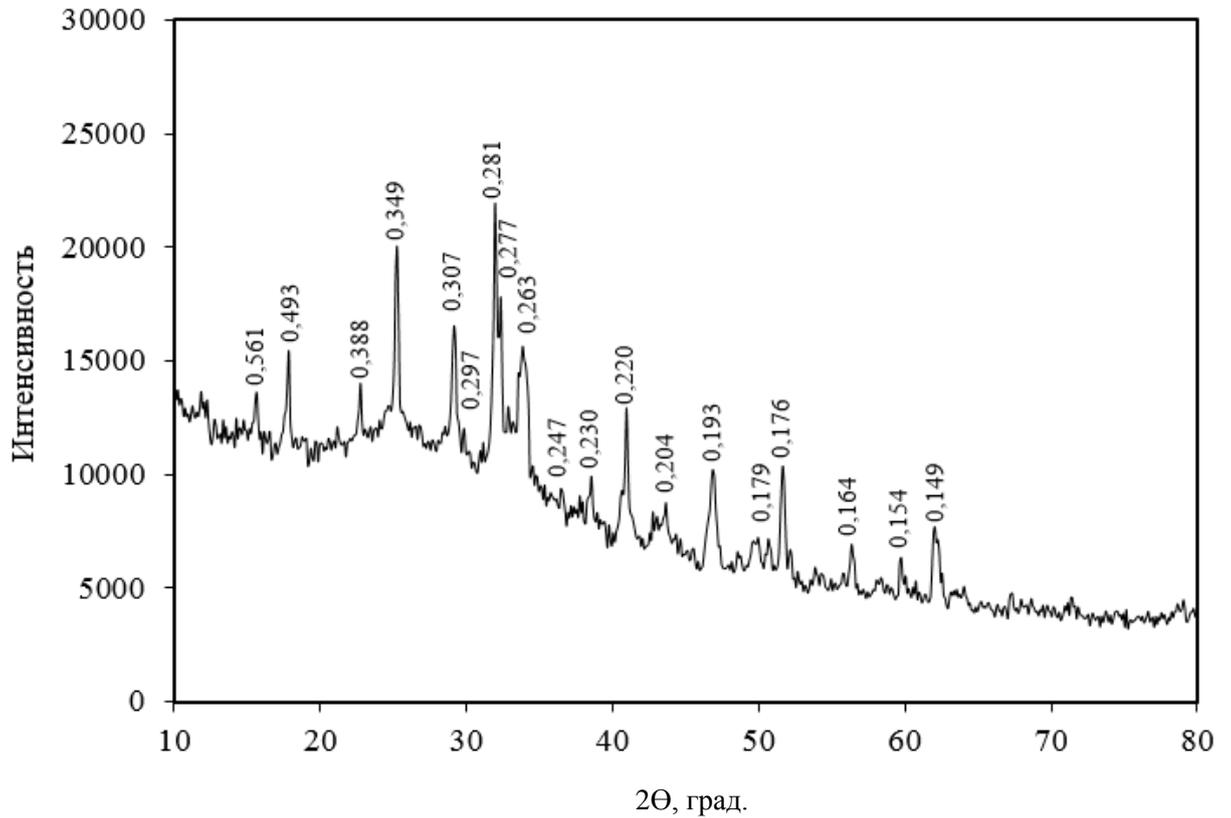


Рисунок 3.13. Рентгенограмма образца камня вяжущего состава № 4 в возрасте 3 суток

В возрасте от 3 до 7 суток твердения наблюдается повышение дифракционных отражений гидросиликатов кальция ($d=0,307$; $0,247$; $0,210$; $0,183$; $0,140$ нм), а также гидроалюминатов кальция C_3AH_6 ($d=0,281$; $0,230$; $0,204$ нм) в модифицированных составах по сравнению с контрольным (рисунок 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, таблица 3.12).

Также, отмечается тенденция более высокой интенсивности дифракционных отражений этtringита ($d=0,561$; $0,469$; $0,388$; $0,349$; $0,324$; $0,261$; $0,220$ нм) в цементных композитах с расширяющими добавками, особенно у составов с добавками СА и ОСА (№3, 4). Эти данные подтверждают положительное влияние мелкодисперсных расширяющих добавок на гидратацию и твердение цементного камня, так как кристаллы этtringита образуют большое число активных центров кристаллизации, способствующих увеличению количества гидратных новообразований в единице объема и формированию более плотного и прочного цементного камня.

Таблица 3.12 – Интенсивность дифракционных отражений минералов

2θ	d, нм	Интенсивность для проб образцов (№ состава – сроки твердения)															
		1-3	1-7	1-14	1-28	2-3	2-7	2-14	2-28	3-3	3-7	3-14	3-28	4-3	4-7	4-14	4-28
Алит – 54CaO·16SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·MgO																	
29,97	0,297	-	-	-	-	25,3	25,2	21,3	20,2	-	24,7	-	24,6	18,9	-	-	-
32,65	0,277	85,4	37,3	-	32,7	98,2	-	87,7	66,3	139,1	39,7	37,1	-	108,7	-	54,1	52,8
38,41	0,232	22,2	-	-	-	40,6	30,4	27,9	16	-	28,2	-	26,9	-	-	-	-
49,81	0,182	-	-	26,4	16,8	-	-	-	-	26,6	-	-	-	-	-	-	-
51,29	0,176	59	54,6	40,4	37	92,7	34,4	-	-	97,7	78,3	46,5	-	78,7	-	-	-
56,15	0,164	31,4	25,9	20,8	19,7	51,4	45,5	41,1	18,7	45,1	25,5	24,6	24,1	35,7	25,7	22	18,9
59,75	0,154	-	-	-	-	39,5	-	30,5	30,3	34,5	27,1	14,3	13,6	30,6	-	-	-
62,20	0,149	37,3	34,5	25	23,2	64	59,2	50,2	22,9	56,3	47,2	34,6	22,8	59,5	34,1	33,5	31,6
Портландит – Ca(OH) ₂																	
17,91	0,493	-	70,8	-	-	73,9	46,3	41	18,4	72,5	80,2	45,3	-	75	167,1	39,1	-
33,72	0,263	118,8	171,6	22,5	38,5	106,5	82,2	126,8	124	141	72,3	102,4	67,6	85,6	62,2	67,6	43,7
46,68	0,193	101,8	100,7	106,3	111,4	87,7	70,4	84,8	73,1	102,9	68,4	98,3	77,4	76,3	76,4	78,5	166,8
50,38	0,179	40,2	48,9	-	20,6	33,9	36,4	97,5	78,2	22,6	30,1	35,2	53,2	22,9	53,8	46,7	49,1
53,95	0,169	20	30,5	-	-	18,4	19,1	29,1	18,4	-	-	19,2	-	-	-	-	-
64,03	0,145	-	19,6	-	-	-	15,1	17,9	-	30,6	-	-	-	-	-	-	-
С – S – Н (Гидросиликат кальция C ₃ SH(II) – 2CaO·SiO ₂ ·2·H ₂ O; Гидросиликат кальция C ₃ SH ₂ – 3CaO·SiO ₂ ·2H ₂ O)																	
17,71	0,501	72	-	19,3	21,3	-	-	-	-	-	-	40,4	31,4	-	-	-	-
28,88	0,307	100	45,3	160	182	119,5	131,2	129,9	202,6	107	137,6	59,3	156	88,9	189,4	200,5	248,3
35,25	0,247	-	-	47,8	46,5	17,3	24,1	21,3	-	-	-	-	-	20,8	-	40	49,1
42,41	0,210	30,5	15,5	101,8	55,7	25,1	41,8	24,3	52,3	-	40,5	-	-	-	25,5	46,5	72,8
45,61	0,199	21	-	17	-	26,5	-	-	23	25	-	-	-	-	-	-	-
49,73	0,183	-	-	82,7	82,8	26,7	21,4	23,4	32,2	-	24,4	25,6	25,4	-	-	37,2	74,5
66,80	0,140	-	-	-	-	16,8	15,4	13,4	16,4	36,5	-	15,3	13,6	-	-	-	33,2
Гидроалюминат кальция C ₃ AH ₆ – 3CaO·Al ₂ O ₃ ·6H ₂ O																	
31,76	0,281	121,3	51	63,6	52,9	208,2	90,2	131,2	160,9	236,8	93,1	103,1	101	182,5	116,6	81,5	74,8
39,09	0,230	21,8	20,5	83,9	65,7	23,2	23,4	-	39,9	48,2	-	-	30,5	38	38,1	44,4	82,7
44,25	0,204	26,2	33,8	34,5	21,2	52,2	32,3	27,6	39,2	-	48,5	51,5	34,4	32,6	24,4	30,9	22,1
Этtringит – 3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·32H ₂ O																	
15,90	0,561	-	-	-	-	-	20,1	-	-	-	36,2	-	-	38,7	-	-	-
18,94	0,469	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32,5	-	-	-	-	-	-
23,31	0,388	36,9	25	24	20	36,7	29,6	26,9	22,4	29,4	46,5	22,7	27,1	42,3	51,3	48,1	54
25,49	0,349	41,3	32,3	-	-	70,4	-	-	-	194,8	27,7	17,6	23,7	139,7	125,4	42	-
27,65	0,324	-	-	-	-	20,9	-	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-
34,75	0,261	29,8	19,4	-	-	-	23,9	-	-	-	27,5	-	-	-	24,1	27,2	-
40,49	0,220	65,9	48,9	29,1	25	70,6	43,4	93,3	89,2	88,3	50,1	68,4	44,5	101,1	52,2	54,2	40,9

Вышеприведенное описание рентгенограмм образцов объясняет прирост прочности в возрасте 7 суток у составов с добавлением расширяющего компонента по сравнению с составом № 1.

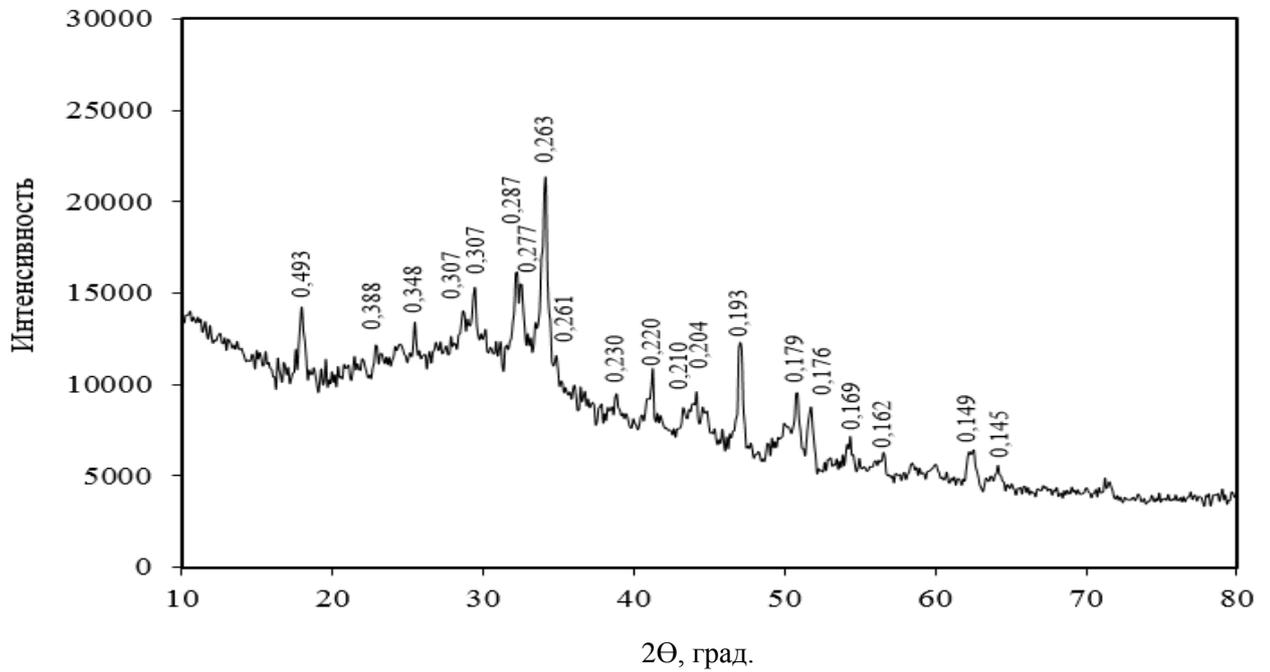


Рисунок 3.14. Рентгенограмма образца камня вяжущего № 1 в возрасте 7 суток

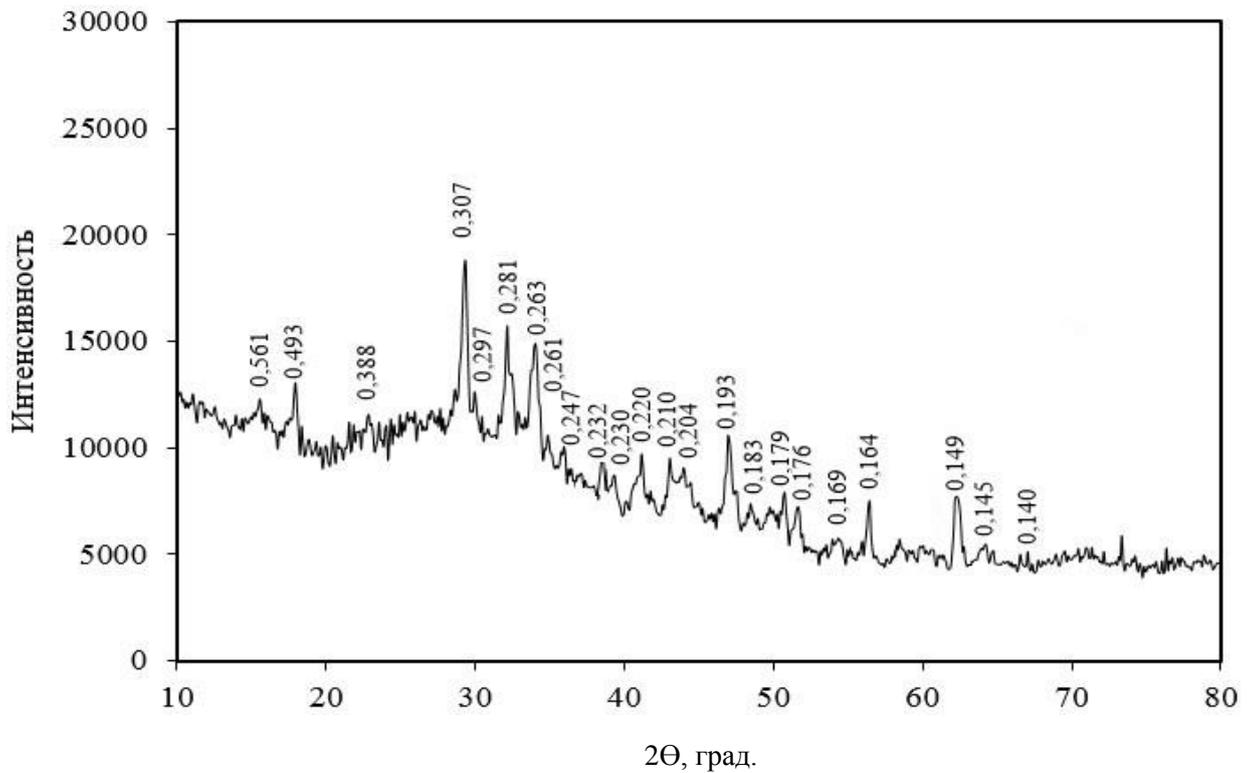


Рисунок 3.15. Рентгенограмма образца камня вяжущего состава № 2 в возрасте 7 суток

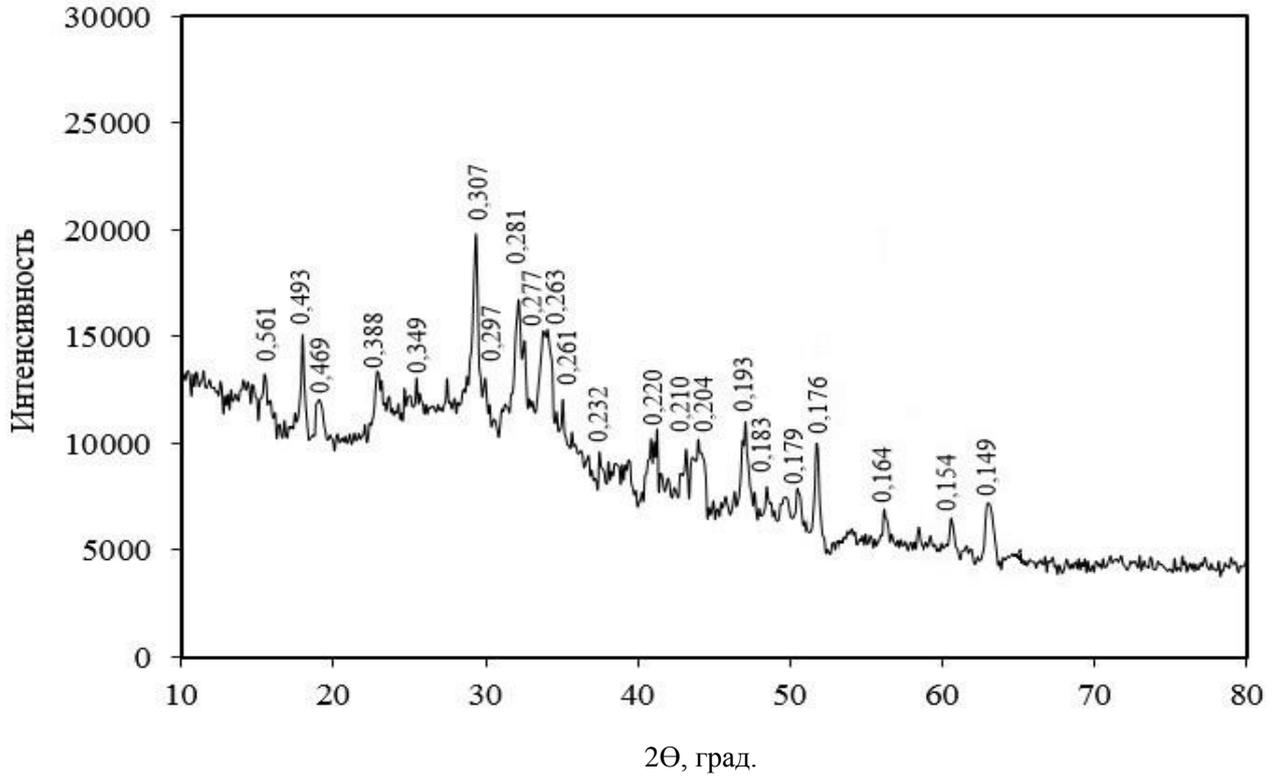


Рисунок 3.16. Рентгенограмма образца камня вяжущего состава № 3 в возрасте 7 суток

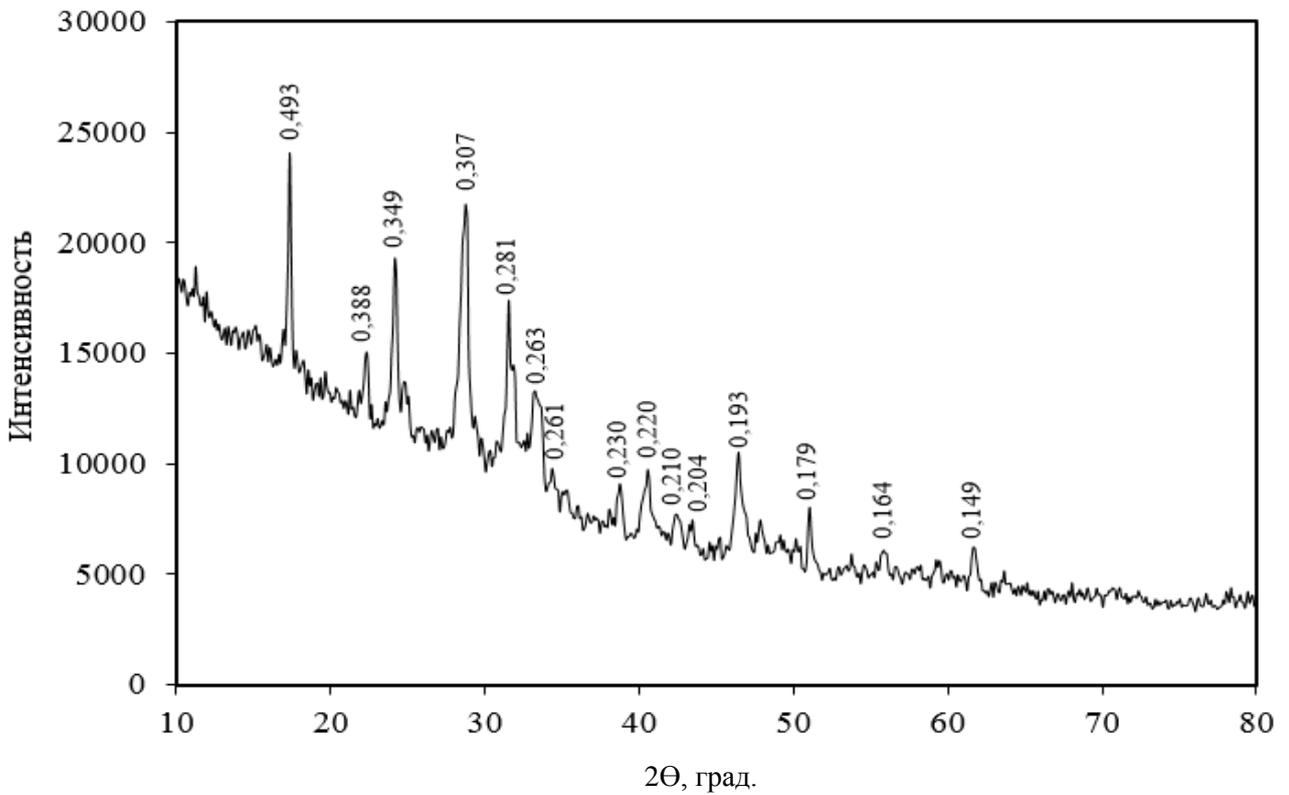


Рисунок 3.17. Рентгенограмма образца камня вяжущего состава № 4 в возрасте 7 суток

В возрасте твердения 14 суток для образцов цементного камня №2-4 дифракционные отражения основных линий алита ($d=0,277$; $0,164$; $0,149$ нм) и гидросиликатов кальция ($d=0,501$; $0,307$; $0,247$; $0,210$; $0,199$; $0,183$; $0,140$ нм) характеризуются как ростом, так и снижением их интенсивностей по сравнению с контрольным составом №1. Прирост прочности составов с расширяющими добавками объясняется ростом линий портландита ($d=0,493$; $0,263$; $0,179$; $0,169$; $0,145$ нм) и гидроалюмината кальция ($d=0,281$; $0,230$; $0,204$ нм). Отмечается уменьшение количества линий этtringита ($d=0,388$; $0,349$; $0,261$; $0,220$ нм) во всех составах, при этом относительная интенсивность выше в модифицированных образцах (рисунок 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, таблица 3.12).

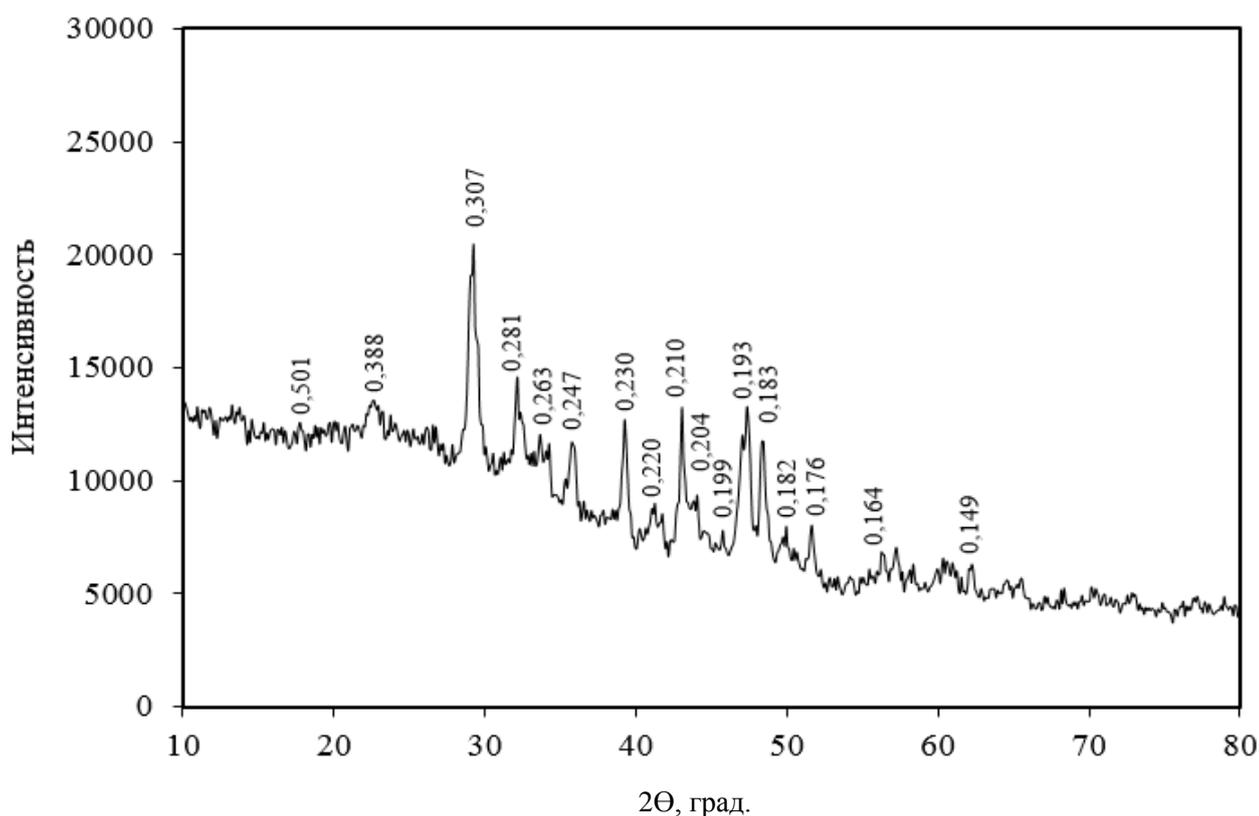


Рисунок 3.18. Рентгенограмма образца камня вяжущего № 1 в возрасте 14 суток

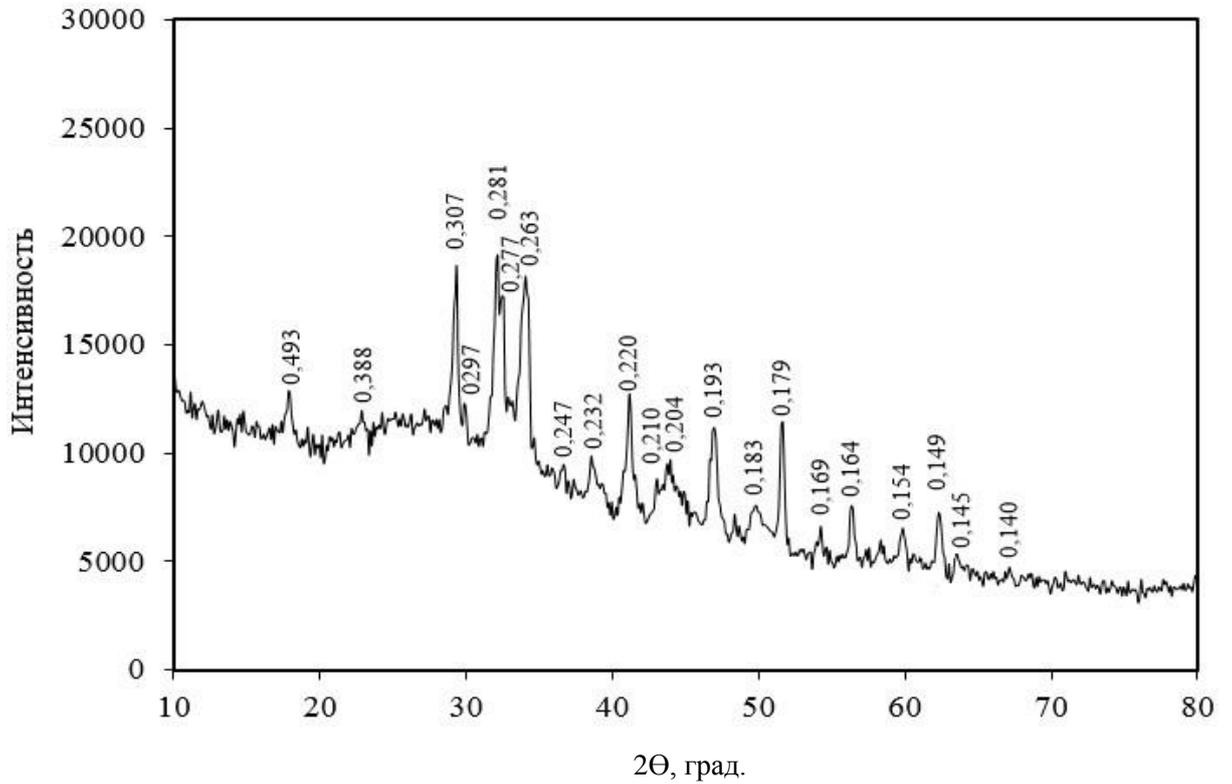


Рисунок 3.19. Рентгенограмма образца камня вяжущего состава № 2 в возрасте 14 суток

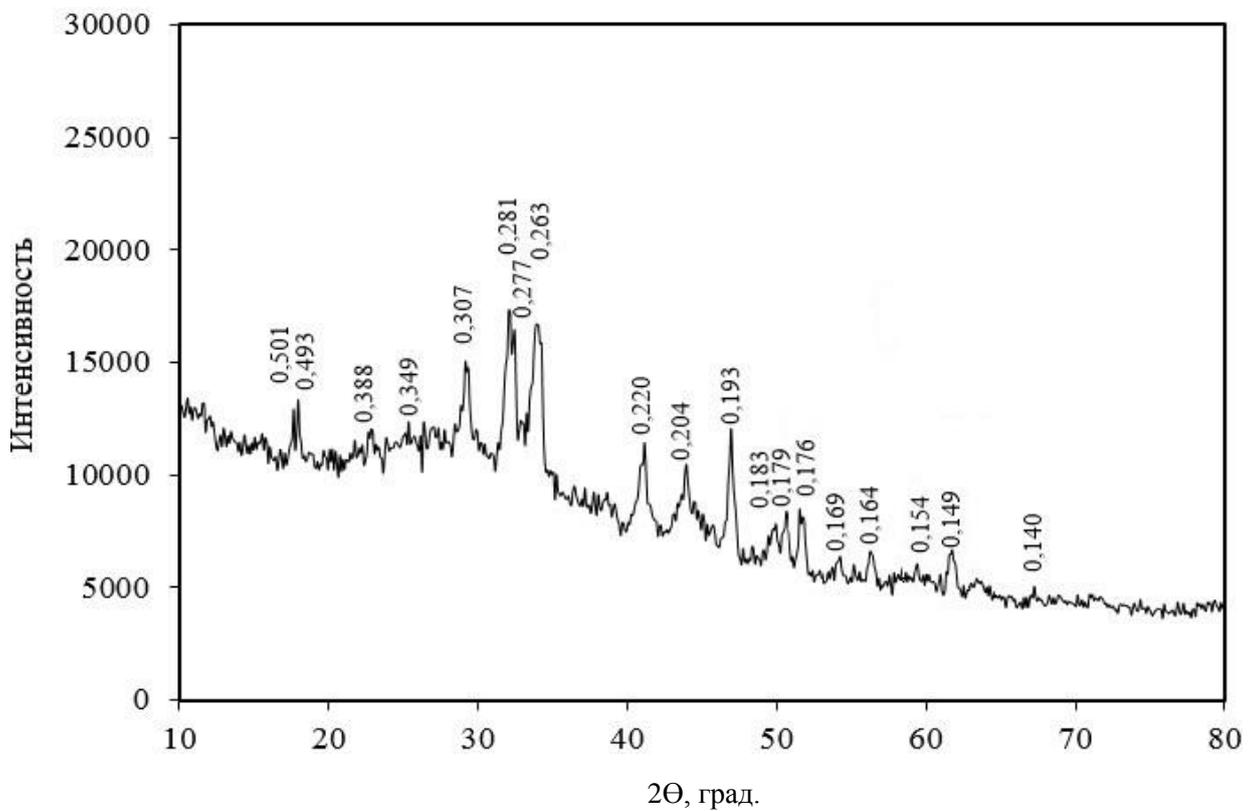


Рисунок 3.20. Рентгенограмма образца камня вяжущего состава № 3 в возрасте 14 суток

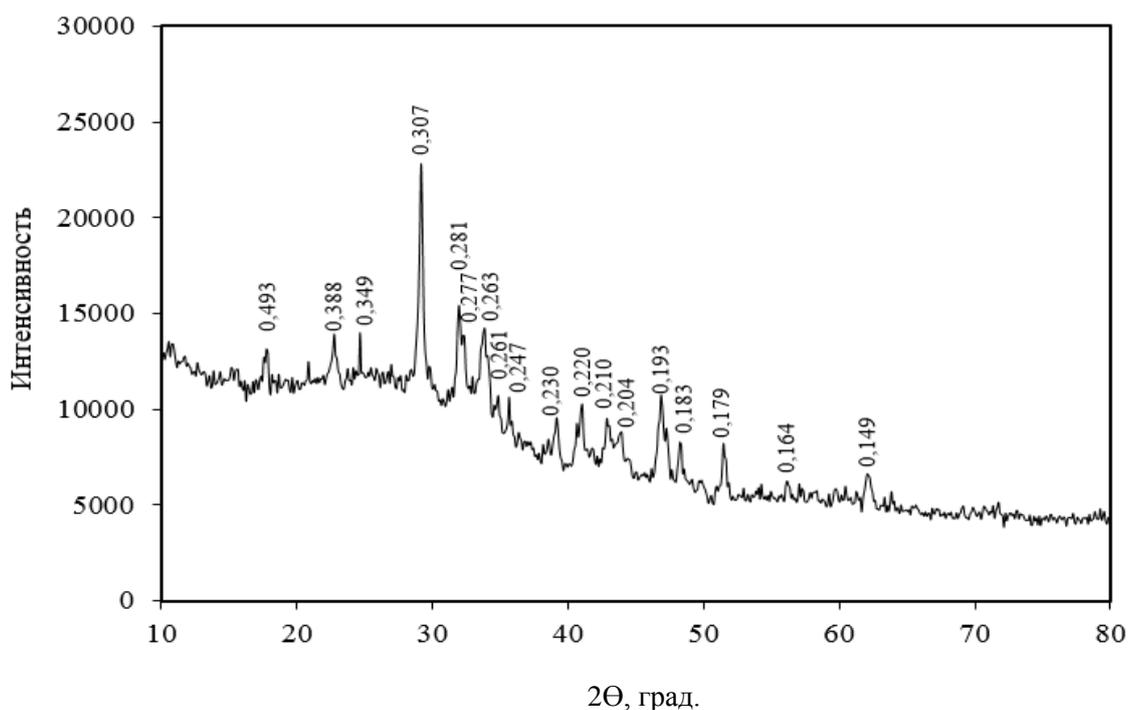


Рисунок 3.21. Рентгенограмма образца камня вяжущего состава № 4 в возрасте 14 суток

В возрасте от 14 до 28 суток у всех образцов цементного камня прослеживаются те же тенденции процесса гидратации, что и в возрасте 7...14 суток (рисунок 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, таблица 3.12).

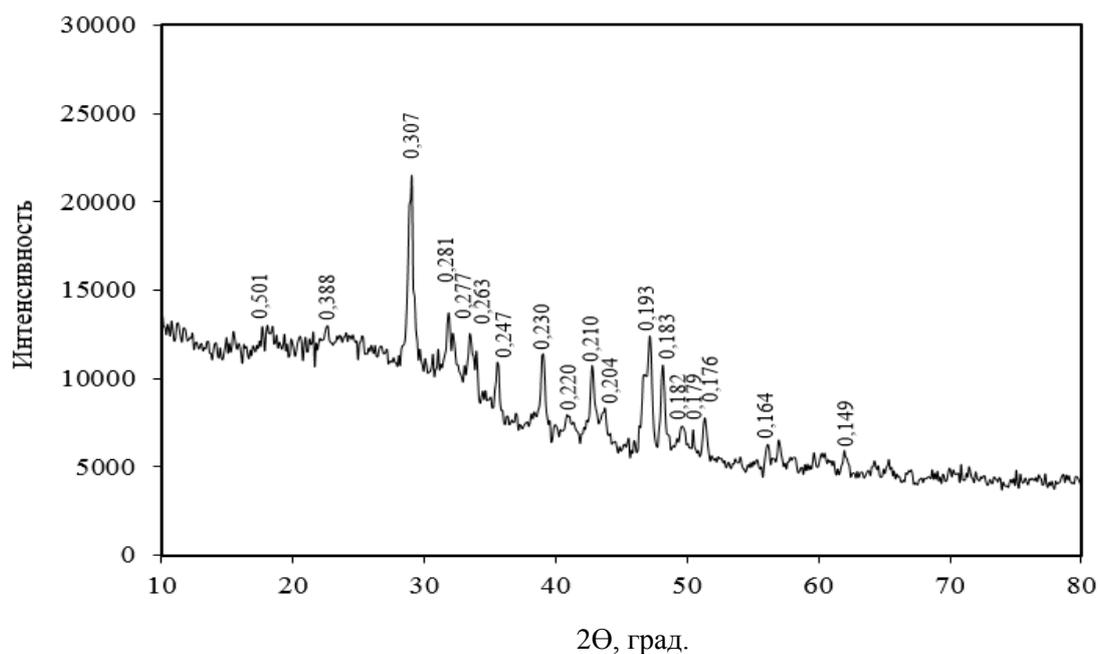


Рисунок 3.22. Рентгенограмма образца камня вяжущего № 1 в возрасте 28 суток

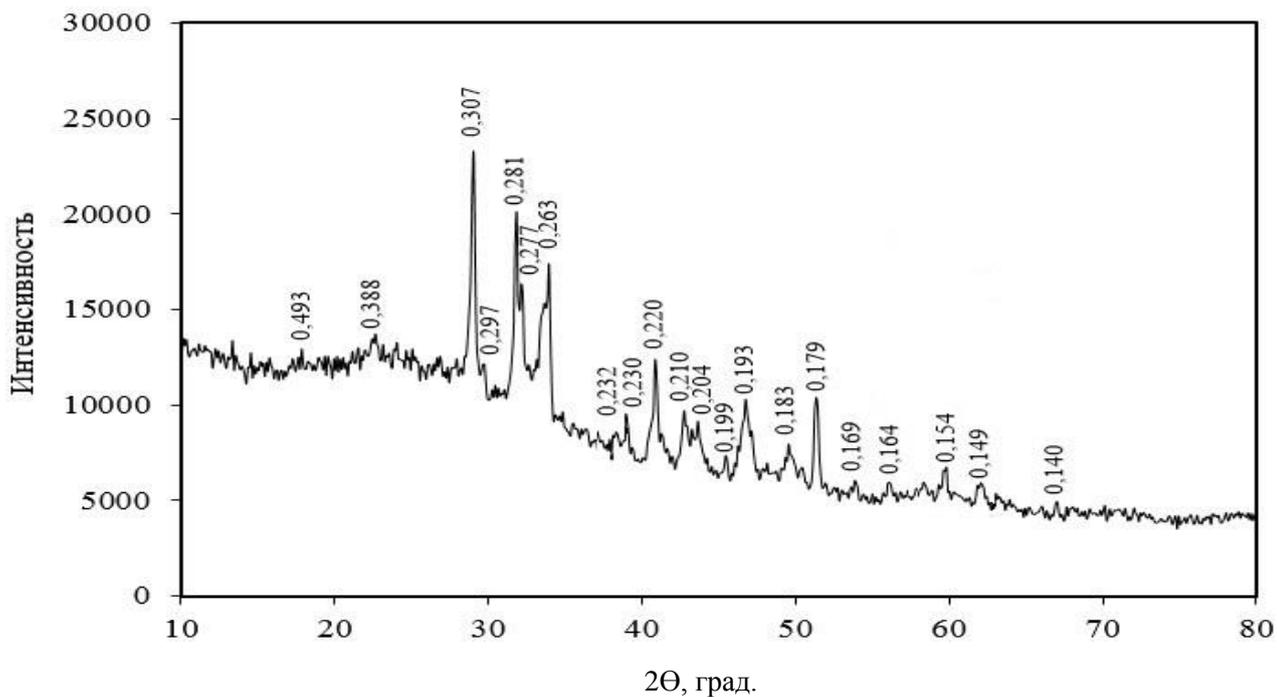


Рисунок 3.23. Рентгенограмма образца камня вяжущего состава № 2 в возрасте 28 суток

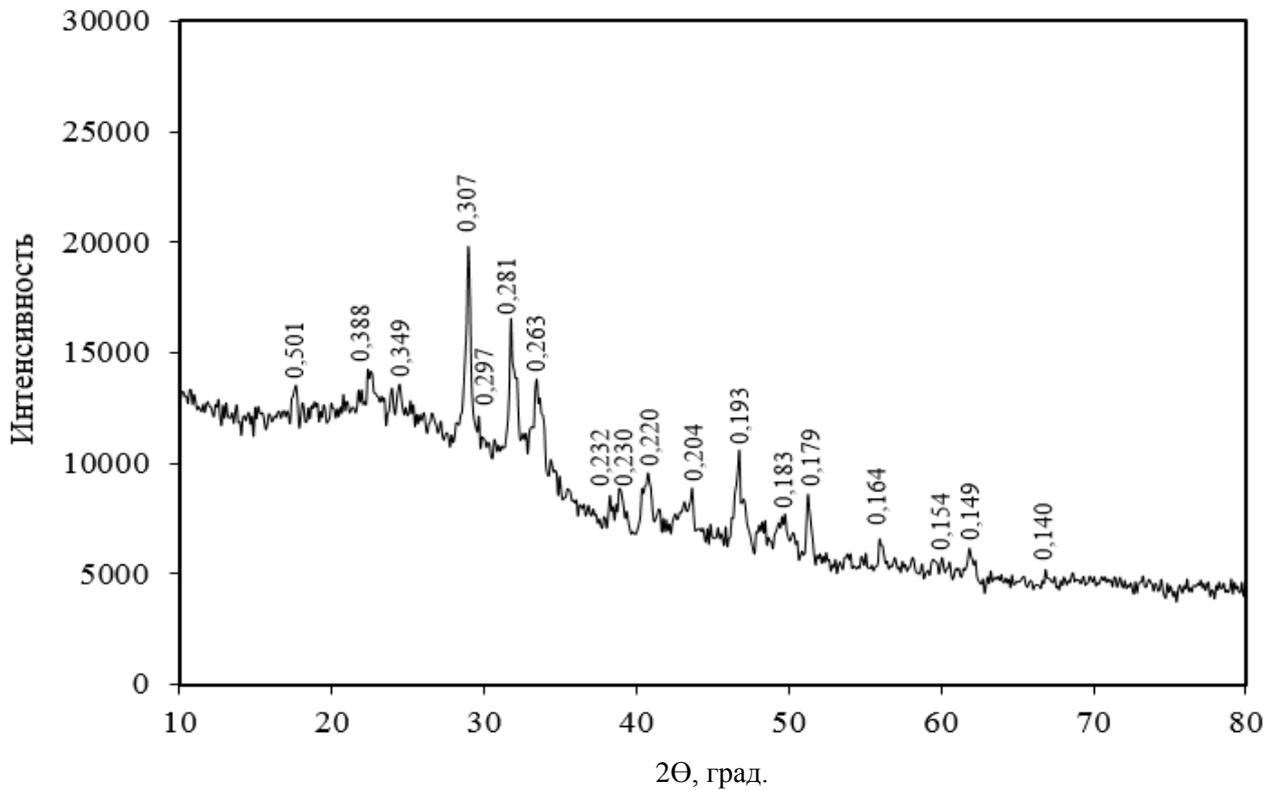


Рисунок 3.24. Рентгенограмма образца камня вяжущего состава № 3 в возрасте 28 суток

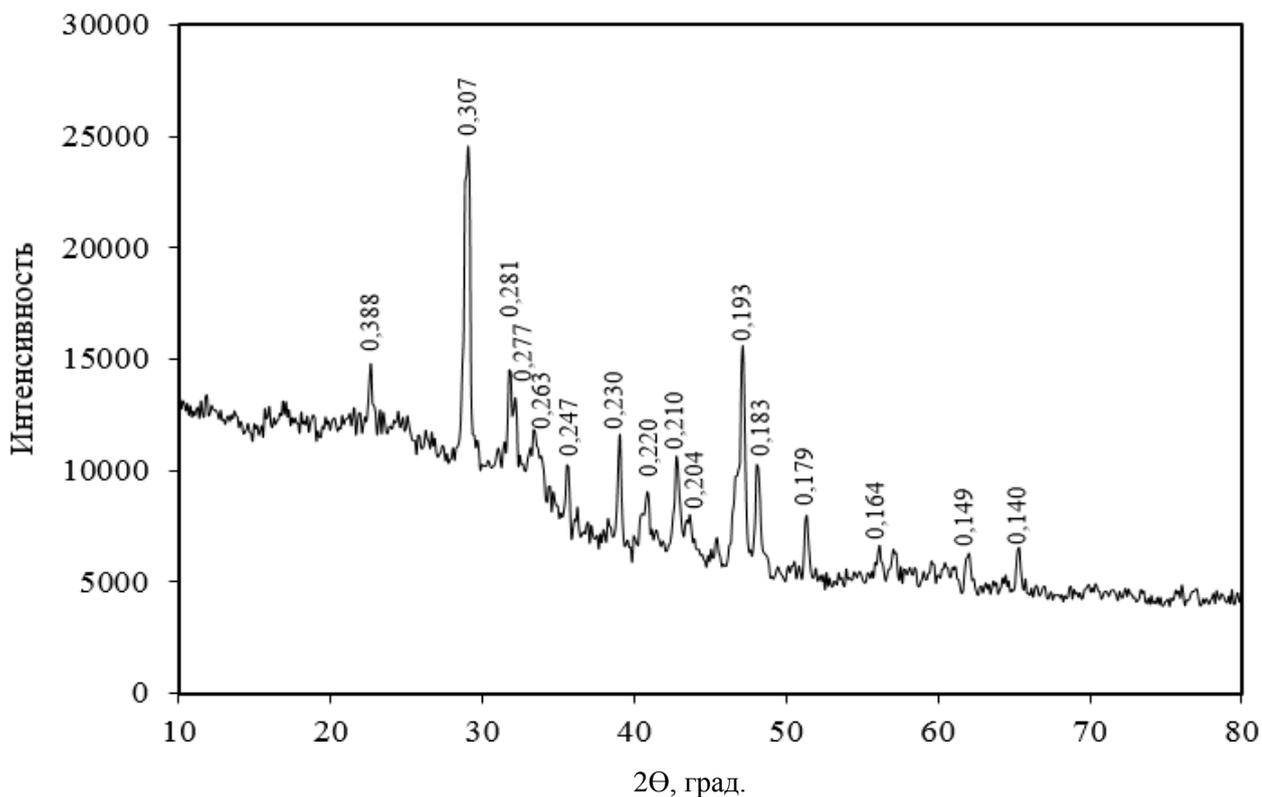


Рисунок 3.25. Рентгенограмма образца камня вяжущего состава № 4 в возрасте 28 суток

На нижеприведенных диаграммах продемонстрированы тенденции снижения/повышения основных линий алита (рисунок 3.26), портландита (рисунок 3.27), гидросиликатов кальция (рисунок 3.28), гидроалюмината кальция (рисунок 3.29) и этtringита (рисунок 3.30) в возрасте 3...28 суток.

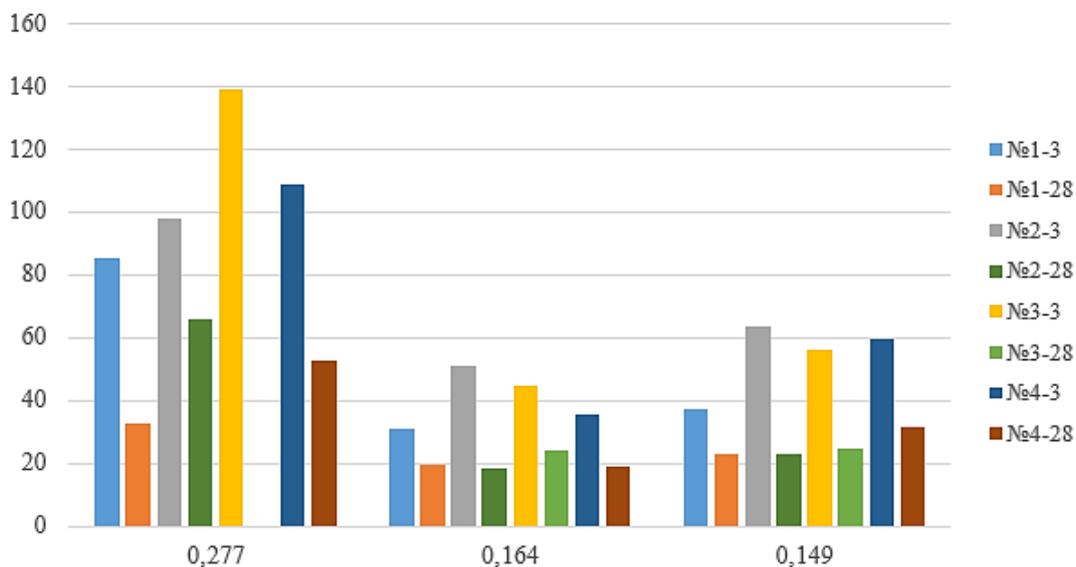


Рисунок 3.26. Относительная интенсивность (%) основных линий алита

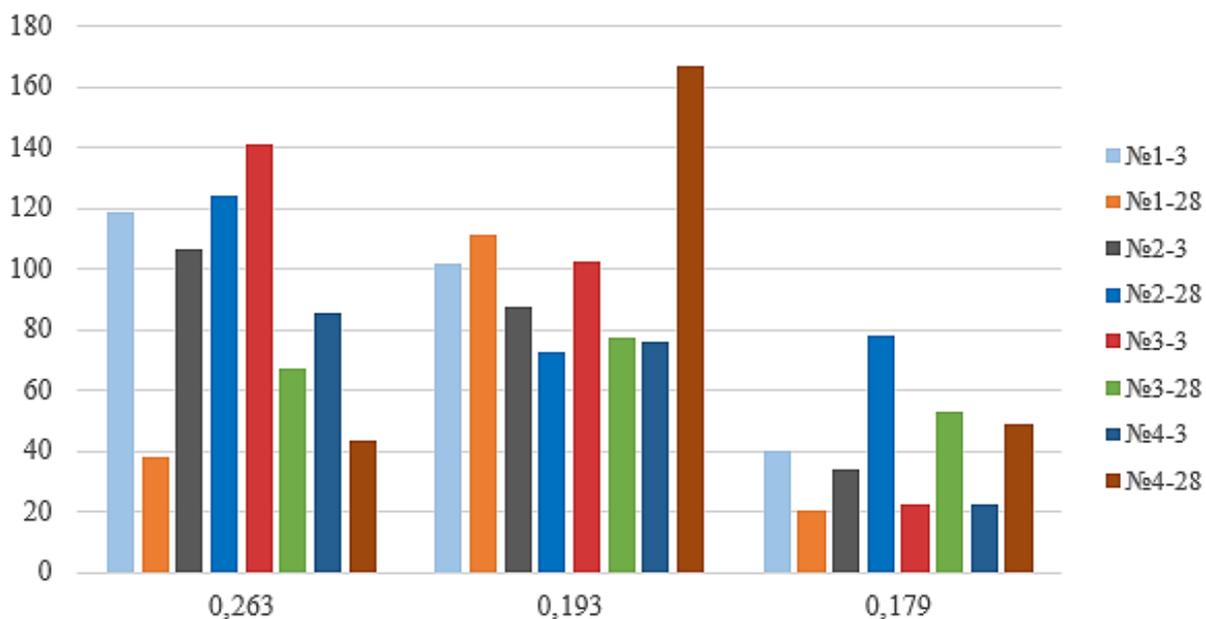


Рисунок 3.27. Относительная интенсивность (%) основных линий
портландита

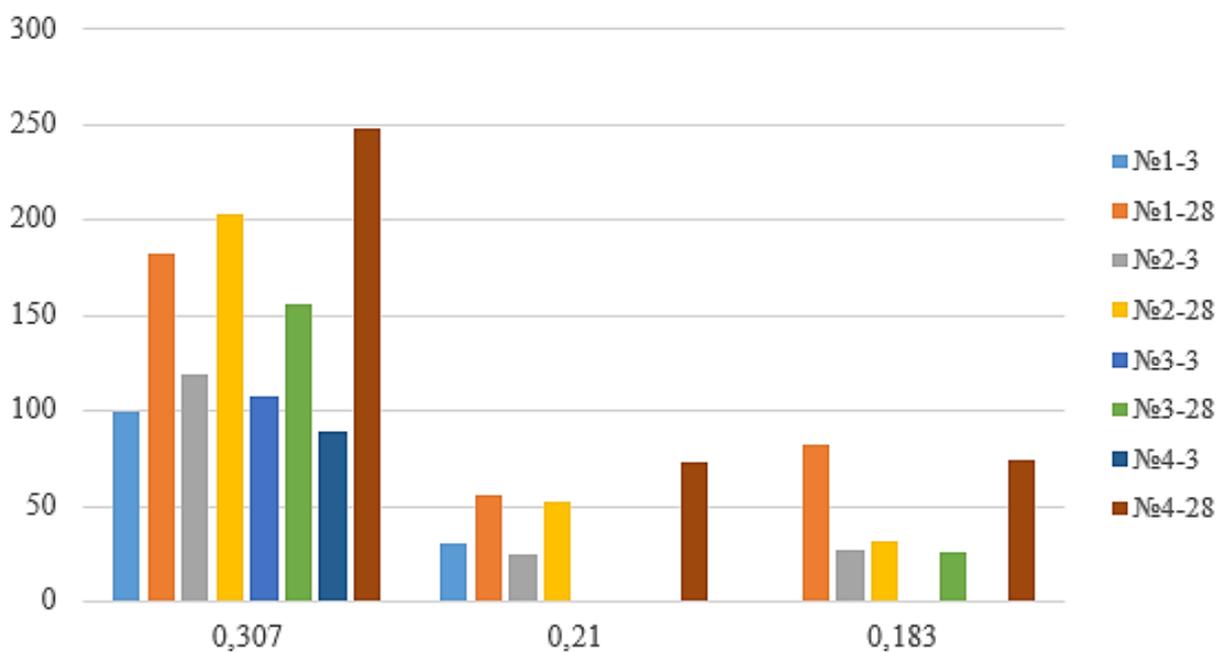


Рисунок 3.28. Относительная интенсивность (%) основных линий
гидросиликатов кальция C-S-H

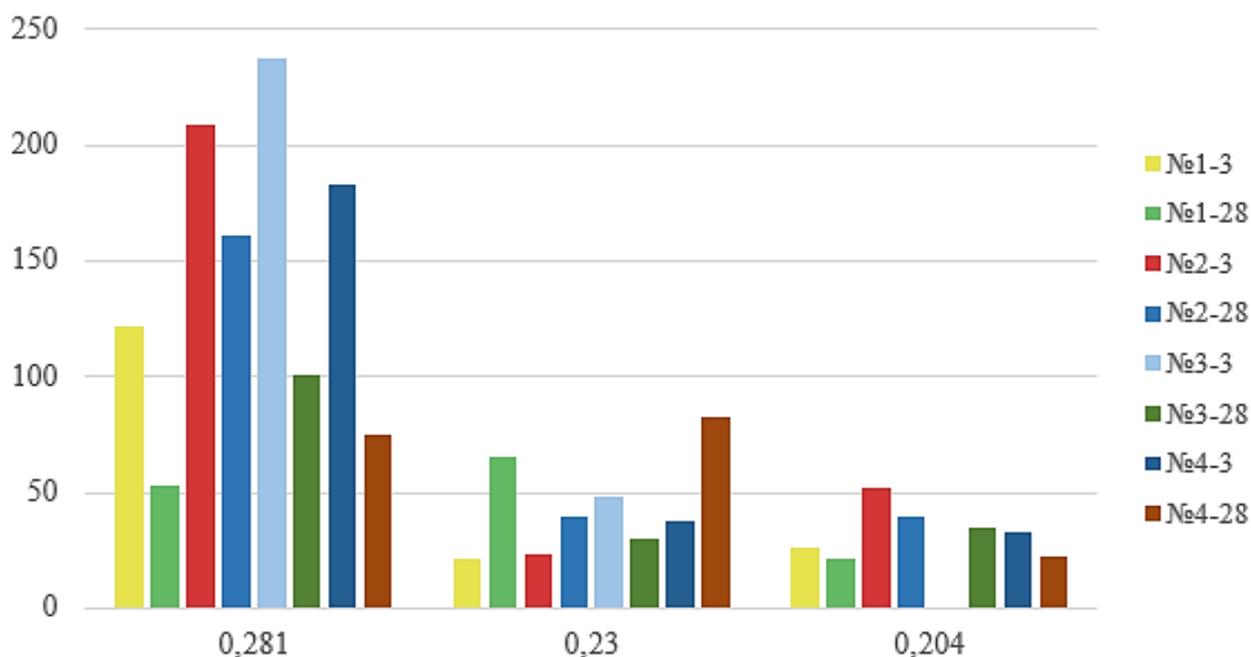


Рисунок 3.29. Относительная интенсивность (%) основных линий гидроалюмината кальция C_3AH_6

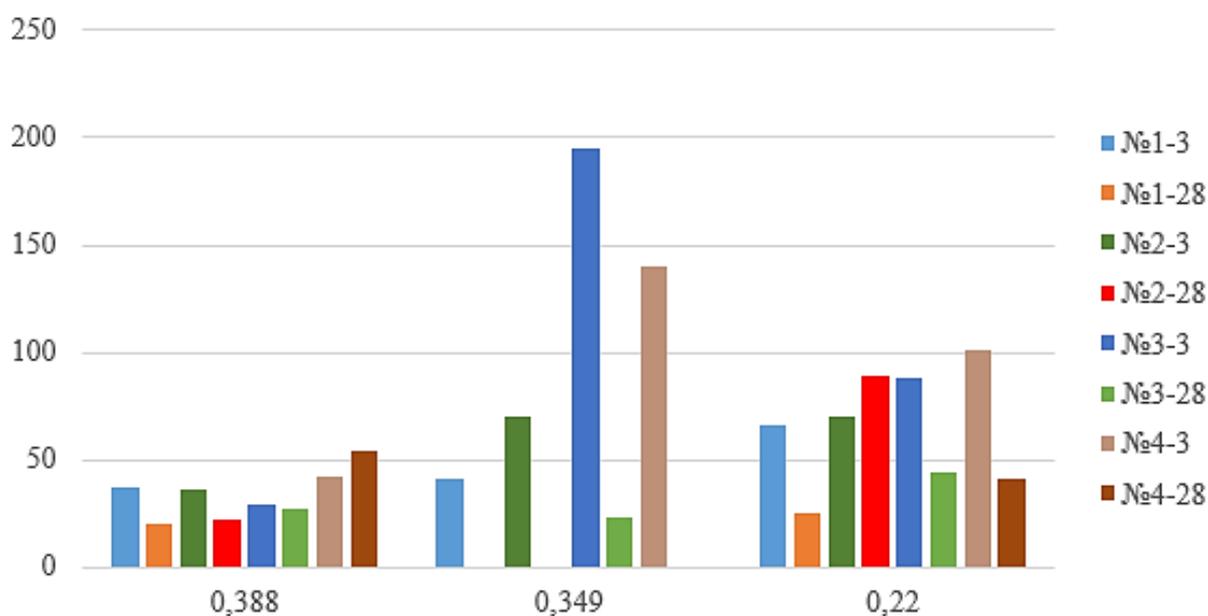


Рисунок 3.30. Относительная интенсивность (%) основных линий этtringита

Позитивное действие расширяющих добавок на структурообразование цементного камня обусловлено образованием повышенного количества гидросиликатов кальция разной основности, стабильных гидроалюминатов

кальция типа C_3AH_6 и этtringита. Также результаты рентгенофазовых исследований составов с расширяющими компонентами на основе сульфоалюминатной и оксидноалюминатной добавок дают основания полагать, что основой расширения цементного камня в раннем возрасте будет являться образование гидросульфоалюмината кальция, при этом отсутствие несвязанного гипса в возрасте 28 суток может свидетельствовать о том, что дополнительное образование этtringита при эксплуатации сооружений из бетона на основе данных цементных композитов, невозможно.

3.4 Влияние расширяющих добавок на кинетику твердения бетона

Для исследования влияния расширяющих компонентов на кинетику твердения в бетонах запроектировано восемь составов, отличающихся наличием расширяющих добавок вариантных типов и содержанием химических добавок СП и SRA (таблица 3.13).

Таблица 3.13

Состав бетонных смесей

№	Расход компонентов, кг(л)/м ³									В/Ц	ОК, см	ρ _{факт} , кг/м ³
	ПЩ	П	Щ	МК	Ехр	СА	ОСА	СП	SRA			
1	400	545	1175	38				5,2		0,44	17	2339
2	400	545	1175	38				5,2	6	0,44	21	2345
3	400	545	1175	38	28			5,2		0,44	16	2380
4	400	545	1175	38	28			5,2	6	0,44	20	2382
5	400	545	1175	38		40		5,2		0,44	16	2379
6	400	545	1175	38		40		5,2	6	0,44	21	2385
7	400	545	1175	38			40	5,2		0,44	16	2383
8	400	545	1175	38			40	5,2	6	0,44	21	2378

В процессе экспериментов определяли технологические свойства модифицированных бетонов (подвижность бетонных смесей) и физико-механические свойства (средняя плотность бетонной смеси, прочность при сжатии).

Приготовление бетонной смеси осуществлялось ручным способом, объем замеса – 9,5 л. Начальная подвижность всех составов запроектирована и изготовлена с классом по удобоукладываемости S4 (осадка конуса 16...21 см). При этом, стоит отметить, что добавка, снижающая усадку SRA являясь по своей природе комплексом неионогенного ПАВ и гликоля положительно влияла на подвижность бетонных смесей. Введение добавки SRA в количестве 1,5 % от массы цемента повышало начальную подвижность как контрольного, так и модифицированных составов на 4-5 см.

После проверки подвижности из бетонной смеси контрольного и модифицированного составов заформовано по девять образцов-кубов с размером ребра 0,1 м каждого состава, которые после твердения в течение суток распалубливали и до испытаний прочности при сжатии в возрасте 7, 28 и 90 суток твердели в нормальных условиях.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что все составы бетона показывают повышение показателя предела прочности при сжатии на протяжении всего периода твердения (рис. 3.31).

Установлено, что при введении в контрольный состав №1 как расширяющей добавки "Expancrete" (состав №3), так и комплекса "Expancrete" + SRA (состав №4), незначительно замедляется твердение бетона в возрасте 7 суток (для состава №3 на 15,4%, для состава №4 – 22,9%), что может быть связано с негативным влиянием расширяющего компонента на напряжения при гидратации в раннем возрасте (рисунок 3.31, составы №1, 3, 4; 3.32).

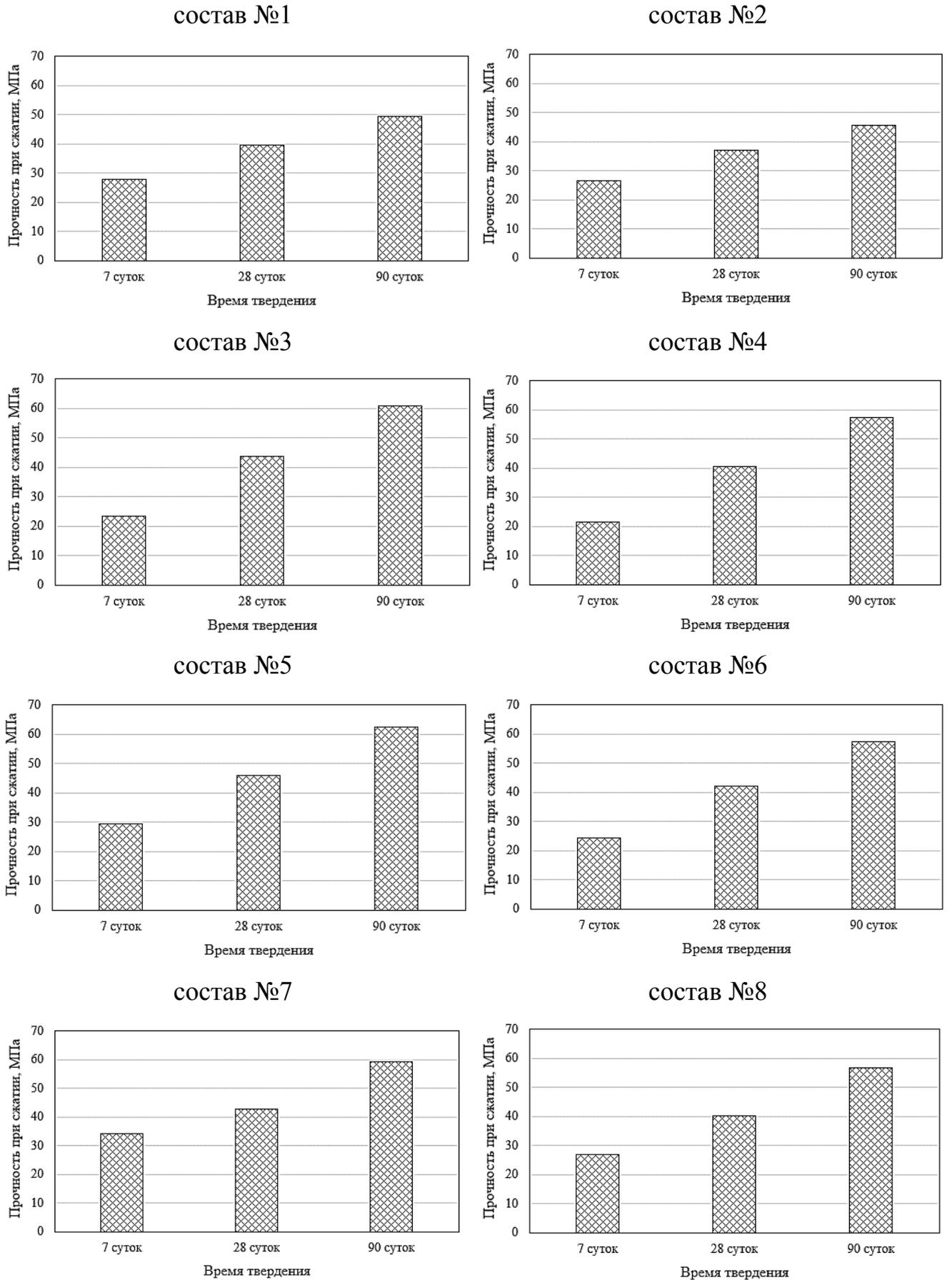


Рисунок 3.31. Кинетика роста прочности бетона при нормальном твердении

Выявлено, что при использовании расширяющей добавки СА (состав №5) или ОСА (состав №7) прочность бетона в раннем возрасте повышается на 5,7% и 22,2% соответственно по сравнению с составом №1, что обусловлено наличием в составе расширяющей добавки алюмосиликатного компонента, который положительно влияет на более интенсивное образование не только этtringита, но и гидросиликатов кальция, совместно обеспечивающих прочность бетона на ранних сроках (рисунок 3.31, составы №1, 5, 7; 3.32).

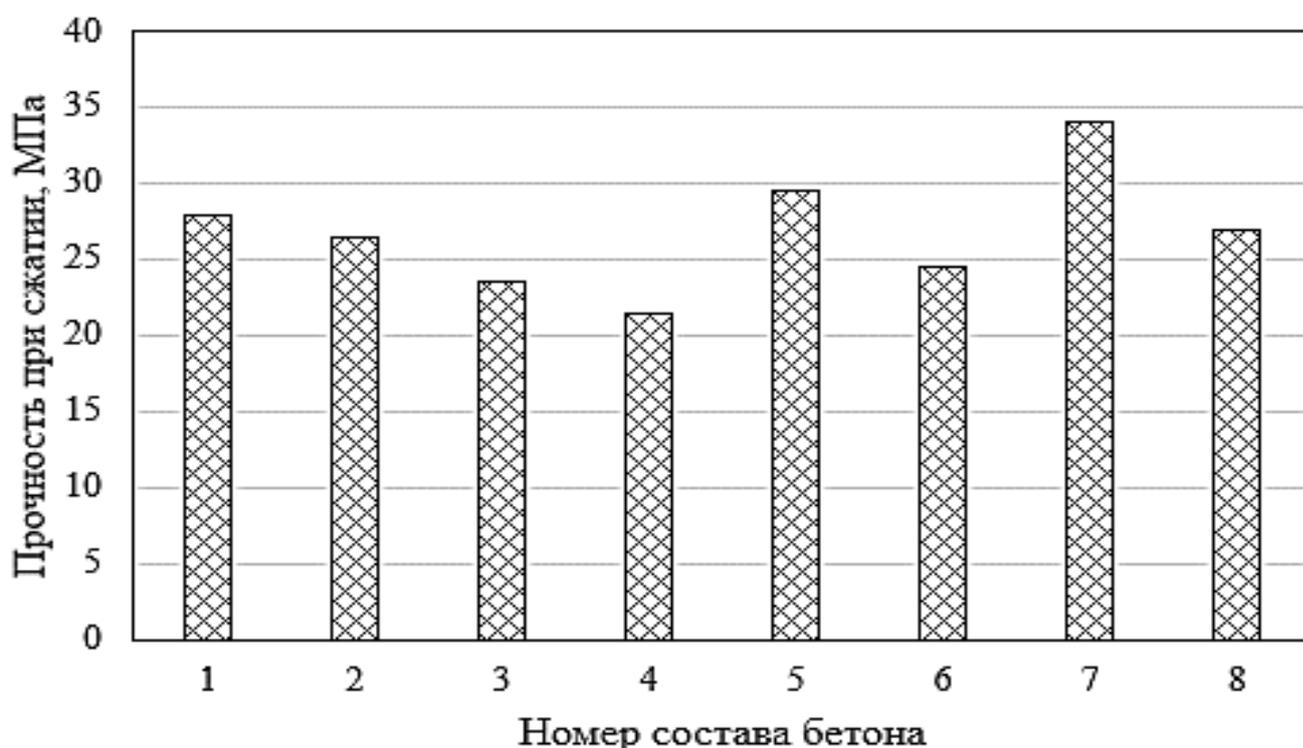


Рисунок 3.32. Предел прочности бетона при сжатии в возрасте 7 суток нормального твердения

В проектном возрасте все составы бетонов, модифицированные расширяющими добавками (составы №3-8), превышают прочность при сжатии контрольного состава №1 на 6,58...16,2%, что является следствием повышения степени гидратации цемента, формирования более плотной и прочной структуры цементного камня (рисунок 3.31, составы №3-8; 3.33).

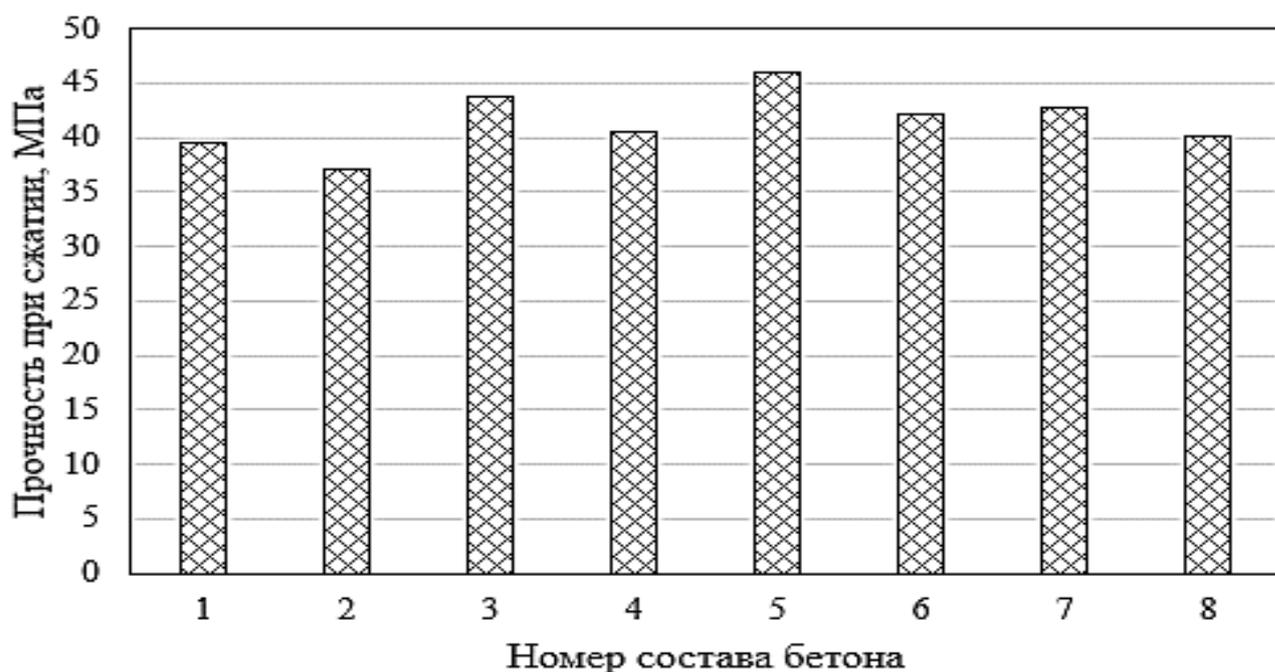


Рисунок 3.33. Предел прочности бетона при сжатии в возрасте 28 суток нормального твердения

В возрасте 90 суток показатели пределов прочности составов №3-8 также выше контрольного уже на 24,8...37,8% (рисунок 3.31, составы №3-8; 3.34).

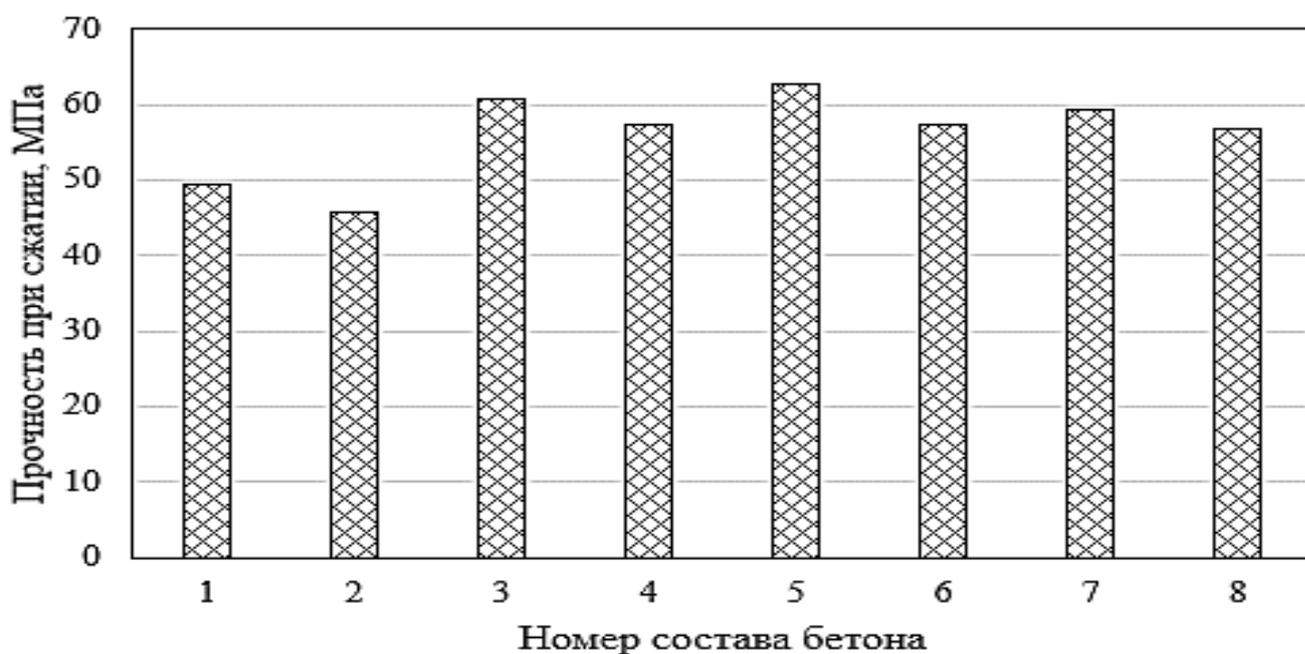


Рисунок 3.34. Предел прочности бетона при сжатии в возрасте 90 суток нормального твердения

Также выявлено, что добавка SRA снижает прочность в раннем (на 5...30,8%), в проектном (на 5,6...9,6%) возрасте и в возрасте 90 суток (на 4,4...8,3%). В разных исследованиях рядом авторов показано, что в отличие от суперпластификаторов, добавка, снижающая усадку SRA, в виде неионогенного полимера практически не адсорбируется на продуктах гидратации. Снижение показателей прочности возможно в связи со снижением степени гидратации цемента, вследствие того, что добавка SRA увеличивает удельную поверхность новообразований и количество физически связанной воды. В итоге в бетонах с низким показателем водоцементного отношения может быть недостаточно воды, доступной для гидратации цемента [63, 146, 147].

Выводы по разделу 3

1. Установлено, что наличие в цементном тесте расширяющей добавки СА (составы №5, 7, 9; таблица 3.1) в количестве 5...15% от массы цемента снижает его начальную подвижность на 9,1...30,9%, а также добавки ОСА (составы №3, 5, 7; таблица 3.6) – на 1,82...23,64% по сравнению с контрольным составом, что связано с высокой водопотребностью компонентов добавок. Однако, по мере нарастания стерического эффекта поликарбоксилатного суперпластификатора происходит увеличение показателей подвижности теста образцов всех составов и потери подвижности в образцах с расширяющими добавками в конечном периоде ниже по отношению к контрольному составу.

2. Введение добавки, снижающей усадку – SRA, в состав цементного теста образцов с расширяющей добавкой СА (составы №6, 8, 10; таблица 3.1) повышает её подвижность на 5,26...16%, а с добавкой ОСА (составы №4, 6, 8; таблица 3.6) – на 3,22...14,3%. Однако, применение добавки SRA снижает прочность цементного камня в раннем возрасте на 12,2...24,2% и в проектном возрасте твердения на 4,1...10,2% по сравнению с образцами без неё, что очевидно связано со снижением степени гидратации цемента, вследствие того, что добавка SRA увеличивает удельную поверхность новообразований и количество физически связанной воды и, как итог, в бетонах с низким показателем водоцементного отношения может быть недостаточно воды, доступной для гидратации цемента

3. Результаты экспериментальных исследований реологических свойств цементного теста и прочностных показателей цементного камня дали основания считать оптимальным содержанием расширяющей добавки СА в цементном камне 10% от массы цемента при количественном соотношении шамотно-каолиновой пыли и гипса 70:30.

4. Установлено, что использование расширяющей добавки ОСА положительно влияет на технологические свойства цементного теста и прочностные характеристики цементного камня при содержании её в цементном

камне 10% от массы цемента при количественном соотношении шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести 65:30:5.

5. Данные рентгенофазового анализа свидетельствуют о том, что введение расширяющих добавок модифицирует состав продуктов гидратации камня вяжущего. Анализ рентгенограмм образцов цементного камня объясняет прирост прочности у составов с расширяющими добавками (составы №2-4) по сравнению с контрольным составом №1 в возрасте 7...28 суток увеличением интенсивности отражений линий минералов, положительно влияющих на прочность цементного камня.

6. По данным рентгенофазового анализа, отмечается повышение дифракционных отражений гидросиликатов кальция ($d=0,307; 0,247; 0,210; 0,183; 0,140$ нм), а также гидроалюминатов кальция C_3AH_6 ($d=0,281; 0,230; 0,204$ нм) в модифицированных составах по сравнению с контрольным, что подтверждает положительное влияние мелкодисперсных расширяющих добавок на гидратацию и твердение цементного камня, так как кристаллы этtringита ($d=0,561; 0,469; 0,388; 0,349; 0,324; 0,261; 0,220$ нм) образуют большое число активных центров кристаллизации, способствующих увеличению количества гидратных новообразований в единице объема и формированию более плотного и прочного цементного камня.

7. Определено, что введение расширяющей добавки на сульфоалюминатной или оксидосульфоалюминатной основе повышает проектную прочность бетона при сжатии на 3,3...16,2% и в возрасте 90 суток на 24,8...37,8% в сравнении с контрольным составом. При этом, отмечается негативное влияние добавки SRA на прочность всех составов, понижая её на 5...31% в раннем возрасте и на 5,5-9% в проектном возрасте твердения.

РАЗДЕЛ 4

ВЛИЯНИЕ ПРИНЯТЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСШИРЯЮЩИХ ДОБАВОК НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНОВ

4.1 Оптимизация состава комплексного модификатора с расширяющей сульфоалюминатной добавкой по критериям подвижности смеси и прочности при сжатии

На основе метода планирования эксперимента (ПФЭ 2^k) выполнена оптимизация состава комплексного модификатора по содержанию суперпластификатора "MasterGlenium 115" (СП) и расширяющей добавки на основе шамотно-каолиновой пыли и гипса (СА). Базовый состав бетонной смеси представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Базовый состав бетонной смеси с расширяющей добавкой СА, принятый для оптимизации

Расход компонентов, кг/м ³				Модификатор, кг(л)/м ³		
ПЦ	Щ	П	В	СА	МК	СП
400	1170	545	175	40	38	5,2

В качестве параметров оптимизации приняты предел прочности бетона при сжатии в проектном возрасте и подвижность бетонной смеси. Граничные значения функций отклика, а также значения факторов варьирования приведены в таблицах 4.2 и 4.3, соответственно.

Таблица 4.2

Параметры оптимизации состава бетонной смеси и их граничные значения

Код параметра оптимизации	Физический смысл параметра оптимизации	Ед. изм.	Граничное значение функции отклика
Y ₁	Подвижность бетонной смеси (осадка стандартного конуса)	см	не менее 16, не более 21
Y ₂	Предел прочности при сжатии образцов бетона в возрасте 28 суток нормального твердения	МПа	не менее 40

Таблица 4.3

Значение факторов варьирования

Код фактора	Физический смысл фактора	Ед. изм.	Интервал варьирования	Уровни фактора		
				-1	0	+1
X ₁	Содержание добавки СП	%*	0,2	1,1	1,3	1,5
X ₂	Содержание добавки СА	%	2	8	10	12

* Примечание: расход добавок в % от массы цемента

Показатель подвижности (осадка конуса, см) для каждого состава бетонной смеси определяли дважды, после чего рассчитывали среднее значение показателя (таблица 4.4). После определения показателя подвижности бетонных смесей формовали образцы-кубы с размером ребра 0,1 м, которые твердели в нормальных условиях на протяжении 28 суток. Для каждого состава изготовлено по три образца, после испытаний на показатель прочности при сжатии определяли среднее значение полученных показателей (таблица 4.5).

Матрица планирования, результаты экспериментов, расчет коэффициентов уравнений регрессии представлены соответственно в таблицах 4.4-4.7.

Таблица 4.4

Матрица планирования и результаты эксперимента (подвижность бетонной смеси)

№ оп.	Кодированное значение факторов		Натуральное значение факторов		Выходная переменная ОК, см			Расчетные показатели	
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂	y _{u1}	y _{u2}	\bar{y}_u	s _u ²	\hat{y}_u
1	+1	+1	1,5	12	15	17	16	2	15,75
2	-1	+1	1,1	12	7	9	8	2	8,25
3	+1	-1	1,5	8	18	21	19,5	4,5	19,75
4	-1	-1	1,1	8	11	14	12,5	4,5	12,25

Таблица 4.5

Матрица планирования и результаты эксперимента (прочность при сжатии)

№ оп.	Кодированное значение факторов		Натуральное значение факторов		Выходная переменная R _{сж} , МПа				Расчетные показатели	
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂	y _{u1}	y _{u2}	y _{u3}	\bar{y}_u	s _u ²	\hat{y}_u
1	+1	+1	1,5	12	46,8	48,5	47,8	47,7	1,46	45,98
2	-1	+1	1,1	12	52,1	50,7	49,9	50,9	2,48	52,58
3	+1	-1	1,5	8	50,1	47,3	48,7	48,7	3,92	47,02
4	-1	-1	1,1	8	39	36,9	40,5	38,8	6,54	40,42

Результаты расчета коэффициентов и статистический анализ уравнения регрессии
(подвижность бетонной смеси)

№	Наименование	Расчетные значения
1.	Коэффициенты регрессии	$b_0=14; b_1=3,75; b_2=-2; b_{12}=0,25$
2.	Построчные дисперсии	$\sum_{u=1}^N s_u^2 = 13$
3.	Критерий Кохрена (расчетное значение)	$G_p = \frac{s_{u_{max}}^2}{\sum s_u^2} = \frac{4,5}{13} = 0,35$
4.	Критерий Кохрена (табличное значение)	$G_m=0,907$ ($q=5\%$, $f_1=m-1=1$, $f_2=N=4$)
5.	Условие однородности	$G_p < G_m$ – выполняется, s_u^2 – однородны
6.	Дисперсия воспроизводимости (ошибка опыта)	$s_0^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum s_u^2 = \frac{1}{4} \cdot 13 = 3,25$
7.	Дисперсия коэффициентов регрессии	$s_{bi}^2 = \frac{s_0^2}{N \cdot m} = \frac{3,25}{4 \cdot 2} = 0,41, s_{bi} = 0,64$
8.	Критерий Стьюдента (расчетное значение)	$t_{bi} = b_i /s_{bi}$; $t_{b0}=21,9$; $t_{b1}=5,86$; $t_{b2}=3,13$; $t_{b12}=0,4$
9.	Критерий Стьюдента (табличное значение)	$t_m=2,78$ ($q=5\%$, $f=N(m-1)=4$)
10.	Условие значимости	выполняется, кроме $t_{b12} < t_m$; (b_{12} – незначим, из уравнения регрессии исключается)
11.	Дисперсия адекватности	$s_{ад}^2 = 0,25$ ($m=2$, $N=4$, $f_{ад}=N-l=4-3=1$)
12.	Критерий Фишера (расчетное значение)	$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s_0^2} = \frac{0,25}{3,25} = 0,076$
13.	Критерий Фишера (табличное значение)	$F_m=7,71$ ($q=5\%$, $f_1=f_{ад}=N-l=4-3=1$, $f_2=4$)
14.	Условие адекватности	$F_p < F_m$ выполняется, уравнение регрессии адекватно процессу
Уравнение регрессии: $\hat{y}_1 = 14 + 3,75X_1 - 2X_2$ (4.1)		

Результаты расчета коэффициентов и статистический анализ уравнения регрессии
(прочность при сжатии)

№	Наименование	Расчетные значения
1.	Коэффициенты регрессии	$b_0=46,5; b_1=1,68; b_2=2,78; b_{12}=-3,3$
2.	Построчные дисперсии	$\sum_{u=1}^N s_u^2 = 14,4$
3.	Критерий Кохрена (расчетное значение)	$G_p = \frac{s_{u\max}^2}{\sum s_u^2} = \frac{6,54}{14,4} = 0,45$
4.	Критерий Кохрена (табличное значение)	$G_m=0,907$ ($q=5\%$, $f_1=m-1=1$, $f_2=N=4$)
5.	Условие однородности	$G_p < G_m$ – выполняется, s_u^2 – однородны
6.	Дисперсия воспроизводимости (ошибка опыта)	$s_0^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum s_u^2 = \frac{1}{4} \cdot 14,4 = 3,6$
7.	Дисперсия коэффициентов регрессии	$s_{bi}^2 = \frac{s_0^2}{N \cdot m} = \frac{3,6}{4 \cdot 2} = 0,45, s_{bi} = 0,67$
8.	Критерий Стьюдента (расчетное значение)	$t_{bi} = b_i /s_{bi}$; $t_{b0}=69,4$; $t_{b1}=2,5$; $t_{b2}=4,14$; $t_{b12}=4,9$
9.	Критерий Стьюдента (табличное значение)	$t_m=2,78$ ($q=5\%$, $f=N(m-1)=4$)
10.	Условие значимости	выполняется, кроме $t_{b1} < t_m$; (b_1 – незначим, из уравнения регрессии исключается)
11.	Дисперсия адекватности	$s_{ад}^2 = 11,23$ ($m=2$, $N=4$, $f_{ад}=N-l=4-3=1$)
12.	Критерий Фишера (расчетное значение)	$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s_0^2} = \frac{11,23}{3,6} = 3,12$
13.	Критерий Фишера (табличное значение)	$F_m=7,71$ ($q=5\%$, $f_1=f_{ад}=N-l=4-3=1$, $f_2=4$)
14.	Условие адекватности	$F_p < F_m$ выполняется, уравнение регрессии адекватно процессу
Уравнение регрессии $\hat{y}_2 = 46,5 + 2,78X_1 - 3,3 X_1X_2$ (4.2)		

Формулы перехода от кодированных значений факторов эксперимента к натуральным для уравнений 4.1 и 4.2 соответственно имеют вид:

$$X_1 = \frac{x_1 - 1,3}{0,2}; X_2 = \frac{x_2 - 10}{2}. \quad (4.3 - 4.4)$$

Графическая интерпретация уравнения регрессии (4.1), характеризующего изменение подвижности бетонных смесей, от действующих факторов (X_1 , X_2) представлена на рисунке 4.1.

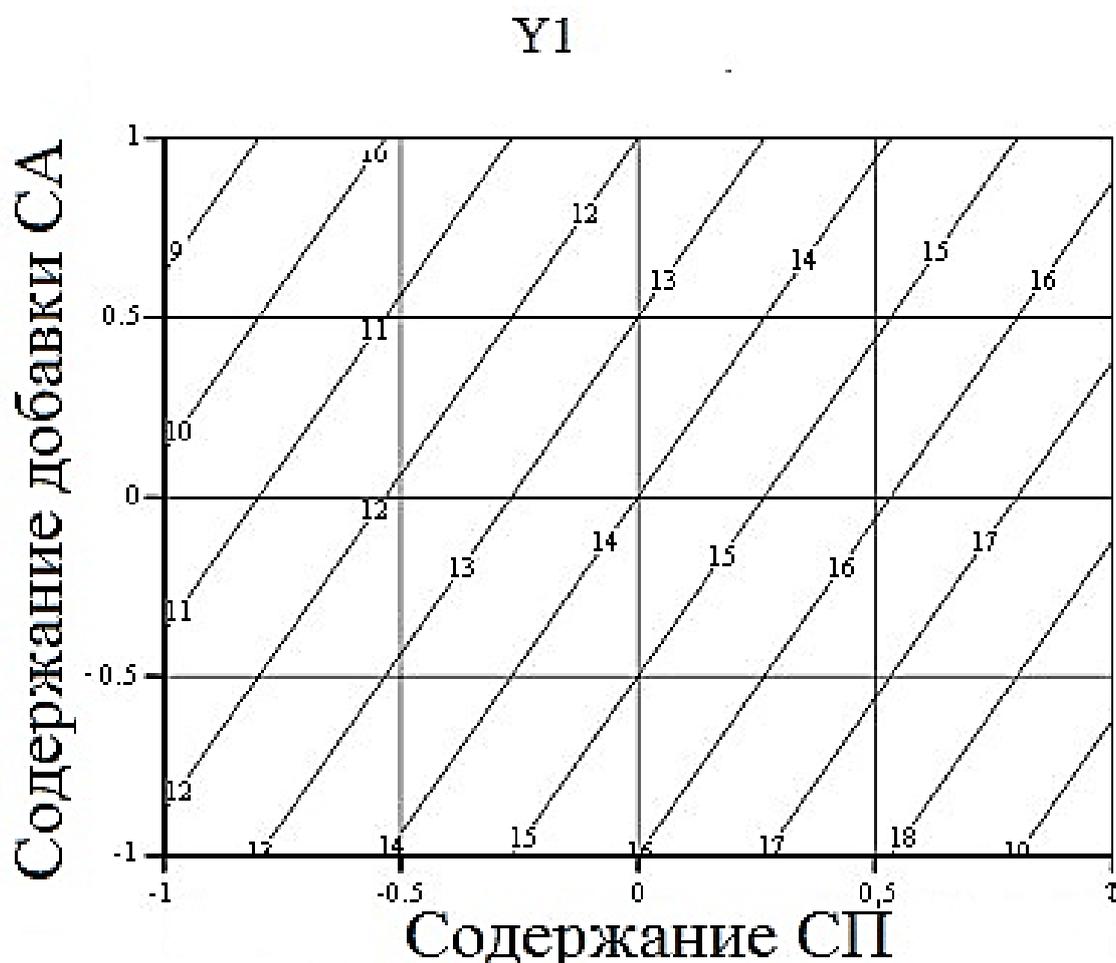


Рис. 4.1. Графическая интерпретация уравнения регрессии (4.1), характеризующего изменение подвижности бетонных смесей от действующих факторов (X_1 , X_2).

Установлено, что на величину пластичности бетонной смеси в большей мере оказывает влияние фактор (X_1) – содержание добавки СП, чем фактор (X_2) – количество расширяющей добавки СА. Повышение содержания СП приводит к повышению подвижности бетонной смеси, напротив повышенное содержание добавки СА снижает пластичность, что является следствием её высокой водопотребности.

Графическая интерпретация уравнения регрессии (4.2), характеризующего изменение предела прочности при сжатии бетона от действующих факторов (X_1 , X_2), представлена на рисунке 4.2.

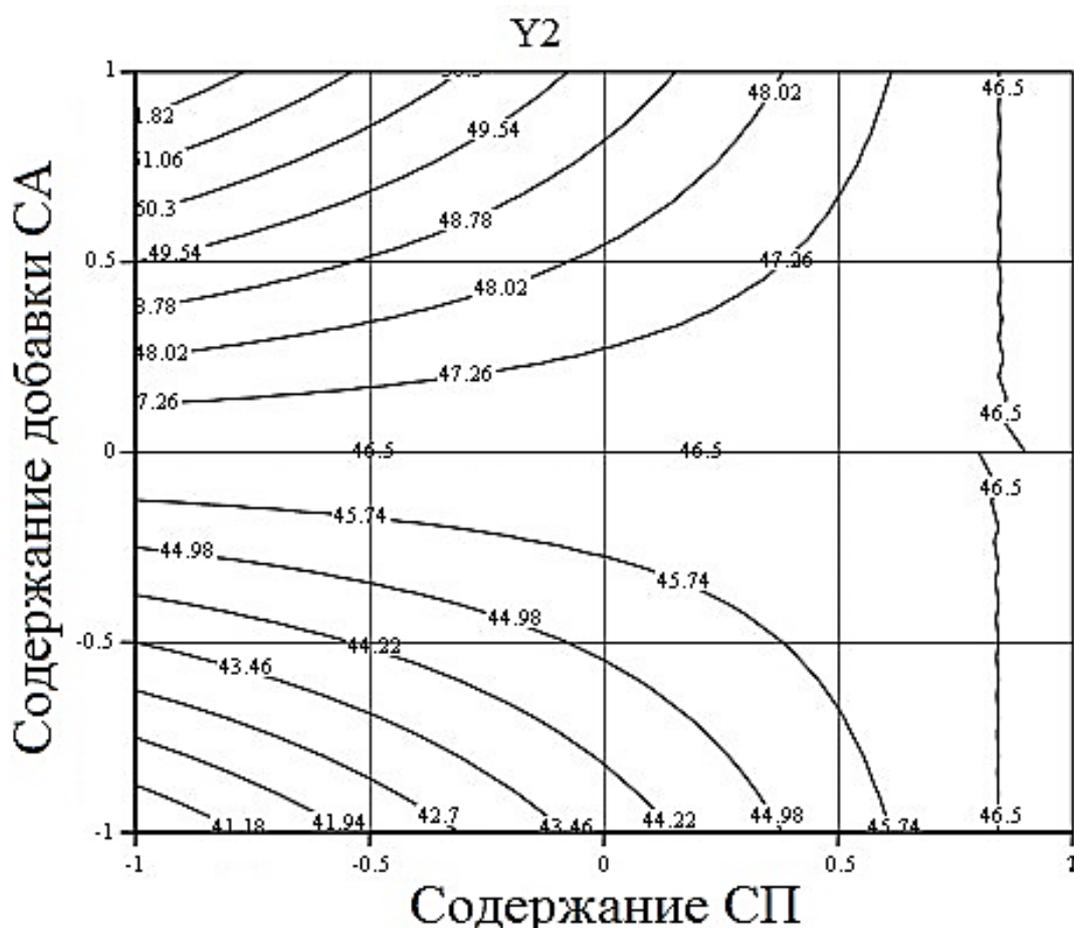


Рис. 4.2. Графическая интерпретация уравнения регрессии (4.2), характеризующего изменение предела прочности при сжатии в возрасте 28 суток от действующих факторов (X_1 , X_2).

Показано, что прочность бетона повышается как при увеличении дозировки СП (фактор X_1), так и расширяющей добавки СА (фактор X_2). При этом, максимальные значения прочности при сжатии достигаются при минимальном содержании СА и максимальном добавке СП.

Область оптимальных составов комплексного модификатора с расширяющей добавкой СА представлена на рисунке 4.3.

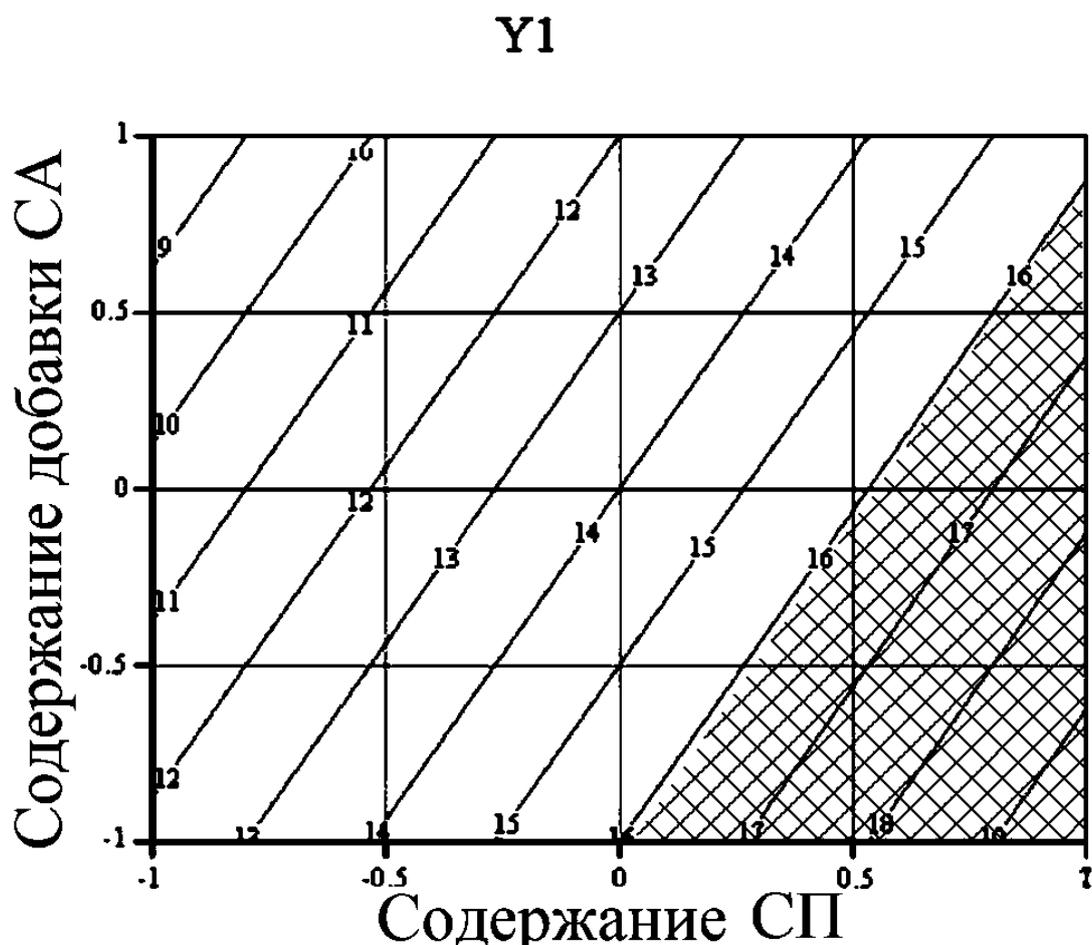


Рис. 4.3 Область оптимальных составов тяжелого цементного бетона с расширяющей добавкой СА

В соответствии с принятыми граничными значениями функций отклика: марка по подвижности П4 и предел прочности при сжатии бетона в проектном возрасте не менее 40 МПа, оптимальным содержанием расширяющей добавки СА считается 8...11,7% от массы цемента, а добавки СП – 1,3...1,5%.

4.2 Оптимизация состава комплексного модификатора с расширяющей оксидносульфоалюминатной добавкой по критериям подвижности смеси и прочности при сжатии

На основе метода планирования эксперимента (ПФЭ 2^k) выполнена оптимизация состава комплексного модификатора по содержанию суперпластификатора "MasterGlenium 115" (СП) и содержанию расширяющего компонента на основе шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести (ОСА). Базовый состав бетонной смеси представлен в табл. 4.8.

Таблица 4.8

Базовый состав бетонной смеси с расширяющей добавкой ОСА, принятый для оптимизации

Расход компонентов, кг/м ³				Модификатор, кг(л)/м ³		
ПЩ	Щ	П	В	ОСА	МК	СП
400	1170	545	175	40	38	5,2

В качестве параметров оптимизации приняты предел прочности бетона при сжатии в проектном возрасте и подвижность бетонной смеси. Граничные значения функций отклика, а также значения факторов варьирования приведены в таблицах 4.9 и 4.10, соответственно.

Таблица 4.9

Параметры оптимизации состава бетонной смеси и их граничные значения

Код параметра оптимизации	Физический смысл параметра оптимизации	Ед. изм.	Граничное значение функции отклика
Y ₁	Подвижность бетонной смеси (осадка стандартного конуса)	см	не менее 16, не более 21
Y ₂	Предел прочности при сжатии образцов бетона в возрасте 28 суток нормального твердения	МПа	не менее 40

Таблица 4.10

Значение факторов варьирования

Код фактора	Физический смысл фактора	Ед. изм.	Интервал варьирования	Уровни фактора		
				-1	0	+1
X ₁	Содержание добавки СП	%*	0,2	1,1	1,3	1,5
X ₂	Содержание добавки ОСА	%	2	8	10	12

* Примечание: расход добавок в % от массы цемента

Показатель подвижности (осадка конуса, см) для каждого состава бетонной смеси определяли дважды, после чего рассчитывали среднее значение показателя (таблица 4.11).

Таблица 4.11

Матрица планирования и результаты эксперимента (подвижность бетонной смеси)

№ оп.	Кодированное значение факторов		Натуральное значение факторов		Выходная переменная ОК, см			Расчетные показатели	
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂	y _{u1}	y _{u2}	\bar{y}_u	s _u ²	\hat{y}_u
1	+1	+1	1,5	12	18	17	17,5	0,5	16,87
2	-1	+1	1,1	12	8	11	9,5	4,5	10,07
3	+1	-1	1,5	8	18	20	19	2	19,67
4	-1	-1	1,1	8	13	14	13,5	0,5	12,87

После определения показателя подвижности бетонных смесей формовали образцы-кубы с размером ребра 0,1 м, которые твердели в нормальных условиях на протяжении 28 суток. Для каждого состава изготовлено по три образца, после испытаний на показатель прочности при сжатии определяли среднее значение полученных значение (таблица 4.12).

Матрица планирования и результаты эксперимента (прочность при сжатии)

№ оп.	Кодированное значение факторов		Натуральное значение факторов		Выходная переменная $R_{сж}$, МПа				Расчетные показатели	
	X_1	X_2	X_1	X_2	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}	\bar{y}_u	s_u^2	\hat{y}_u
1	+1	+1	1,5	12	34	36,5	35	35,17	3,16	36,5
2	-1	+1	1,1	12	42	40,7	41,5	41,4	0,86	41,3
3	+1	-1	1,5	8	43,7	42,1	45,3	43,7	5,12	40,1
4	-1	-1	1,1	8	41,5	42,6	43,7	42,6	2,42	44,9

Результаты расчетов коэффициентов уравнений регрессии представлены соответственно в таблицах 4.13-4.14.

Формулы перехода от кодированных значений факторов эксперимента к натуральным для уравнений 4.5 и 4.6 соответственно имеют вид:

$$X_1 = \frac{x_1 - 1,3}{0,2}; X_2 = \frac{x_2 - 10}{2}. \quad (4.7 - 4.8)$$

Графическая интерпретация уравнения регрессии (4.5), характеризующего изменение подвижности бетонных смесей от действующих факторов (X_1 , X_2) представлена на рис. 4.4. Установлено, что на величину текучести бетонной смеси в большей мере оказывает влияние фактор (X_1) – содержание добавки СП, чем фактор (X_2) – содержание компонента ОСА. Повышение содержания добавки СП приводит к повышению текучести бетонной смеси, напротив повышенное содержание расширяющей добавки ОСА снижает текучесть, что является следствием его высокой водопотребности.

Результаты расчета коэффициентов и статистический анализ уравнения регрессии
(подвижность бетонной смеси)

№	Наименование	Расчетные значения
1.	Коэффициенты регрессии	$b_0=14,87; b_1=3,4; b_2=-1,4; b_{12}=0,625$
2.	Построчные дисперсии	$\sum_{u=1}^N s_u^2 = 7,5$
3.	Критерий Кохрена (расчетное значение)	$G_p = \frac{s_{u_{max}}^2}{\sum s_u^2} = \frac{4,5}{7,5} = 0,6$
4.	Критерий Кохрена (табличное значение)	$G_m=0,907$ ($q=5\%$, $f_1=m-1=1$, $f_2=N=4$)
5.	Условие однородности	$G_p < G_m$ – выполняется, s_u^2 – однородны
6.	Дисперсия воспроизводимости (ошибка опыта)	$s_0^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum s_u^2 = \frac{1}{4} \cdot 7,5 = 1,87$
7.	Дисперсия коэффициентов регрессии	$s_{bi}^2 = \frac{s_0^2}{N \cdot m} = \frac{1,87}{4 \cdot 2} = 0,23, s_{bi} = 0,48$
8.	Критерий Стьюдента (расчетное значение)	$t_{bi} = b_i /s_{bi}$; $t_{b0}=30,7$; $t_{b1}=6,97$; $t_{b2}=2,84$; $t_{b12}=1,3$
9.	Критерий Стьюдента (табличное значение)	$t_m=2,78$ ($q=5\%$, $f=N(m-1)=4$)
10.	Условие значимости	выполняется, кроме $t_{b12} < t_m$; (b_{12} – незначим, из уравнения регрессии исключается)
11.	Дисперсия адекватности	$s_{ад}^2 = 1,56$ ($m=2$, $N=4$, $f_{ад}=N-l=4-3=1$)
12.	Критерий Фишера (расчетное значение)	$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s_0^2} = \frac{1,56}{1,87} = 0,83$
13.	Критерий Фишера (табличное значение)	$F_m=7,71$ ($q=5\%$, $f_1=f_{ад}=N-l=4-3=1$, $f_2=4$)
14.	Условие адекватности	$F_p < F_m$ выполняется, уравнение регрессии адекватно процессу
Уравнение регрессии: $\hat{y}_1 = 14,87 + 3,4X_1 - 1,4X_2$ (4.5)		

Результаты расчета коэффициентов и статистический анализ уравнения регрессии
(прочность при сжатии)

№	Наименование	Расчетные значения
1.	Коэффициенты регрессии	$b_0=40,7; b_1=-1,3; b_2=-2,4; b_{12}=-1,8$
2.	Построчные дисперсии	$\sum_{u=1}^N s_u^2 = 11,56$
3.	Критерий Кохрена (расчетное значение)	$G_p = \frac{s_{u\max}^2}{\sum s_u^2} = \frac{5,12}{11,56} = 0,44$
4.	Критерий Кохрена (табличное значение)	$G_m=0,907$ ($q=5\%$, $f_1=m-1=1$, $f_2=N=4$)
5.	Условие однородности	$G_p < G_m$ – выполняется, s_u^2 – однородны
6.	Дисперсия воспроизводимости (ошибка опыта)	$s_0^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum s_u^2 = \frac{1}{4} \cdot 11,56 = 2,89$
7.	Дисперсия коэффициентов регрессии	$s_{bi}^2 = \frac{s_0^2}{N \cdot m} = \frac{2,89}{4 \cdot 2} = 0,36, s_{bi} = 0,6$
8.	Критерий Стьюдента (расчетное значение)	$t_{bi} = b_i /s_{bi}; t_{b0}=67,7; t_{b1}=2,1; t_{b2}=4,0;$ $t_{b12}=3,0$
9.	Критерий Стьюдента (табличное значение)	$t_m=2,78$ ($q=5\%$, $f=N(m-1)=4$)
10.	Условие значимости	выполняется, кроме $t_{b1} < t_m$; (b_1 – незначим, из уравнения регрессии исключается)
11.	Дисперсия адекватности	$s_{ад}^2 = 20,03$ ($m=2$, $N=4$, $f_{ад}=N-l=4-3=1$)
12.	Критерий Фишера (расчетное значение)	$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s_0^2} = \frac{20,03}{2,89} = 6,93$
13.	Критерий Фишера (табличное значение)	$F_m=7,71$ ($q=5\%$, $f_1=f_{ад}=N-l=4-3=1$, $f_2=4$)
14.	Условие адекватности	$F_p < F_m$ выполняется, уравнение регрессии адекватно процессу
Уравнение регрессии $\hat{y}_2 = 40,7 - 2,4X_1 - 1,8 X_1X_2$ (4.6)		

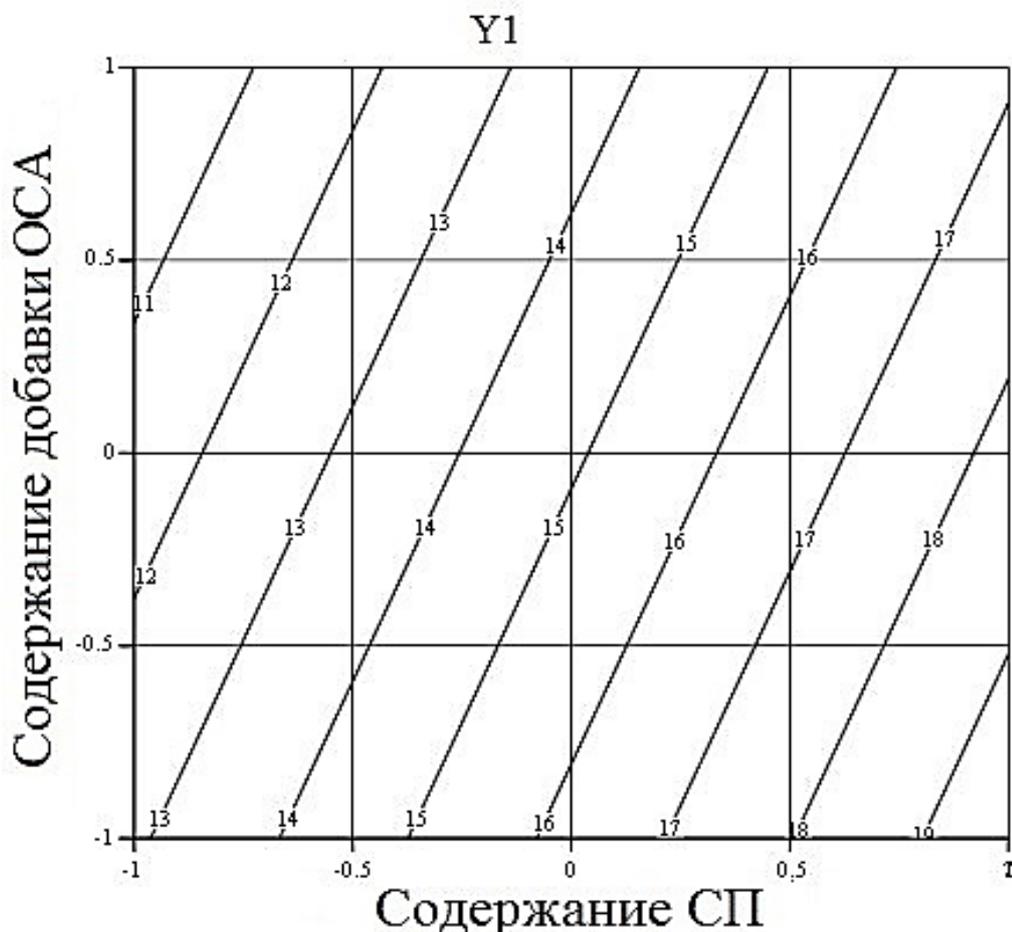


Рис. 4.4. Графическая интерпретация уравнения регрессии (4.5), характеризующего изменение подвижности бетонных смесей от действующих факторов (X_1 , X_2).

Графическая интерпретация уравнения регрессии (4.6), характеризующего изменение предела прочности при сжатии бетона от действующих факторов (X_1 , X_2), представлена на рис. 4.5. Показано, что прочность бетона повышается при увеличении дозировки СП (фактор X_1) и снижении количества вводимой расширяющей добавки ОСА (фактор X_2). Также присутствует вторая зависимость повышения прочности: при повышении содержания добавки ОСА необходимая прочность (40 МПа) достигается при снижении количества суперпластификатора.

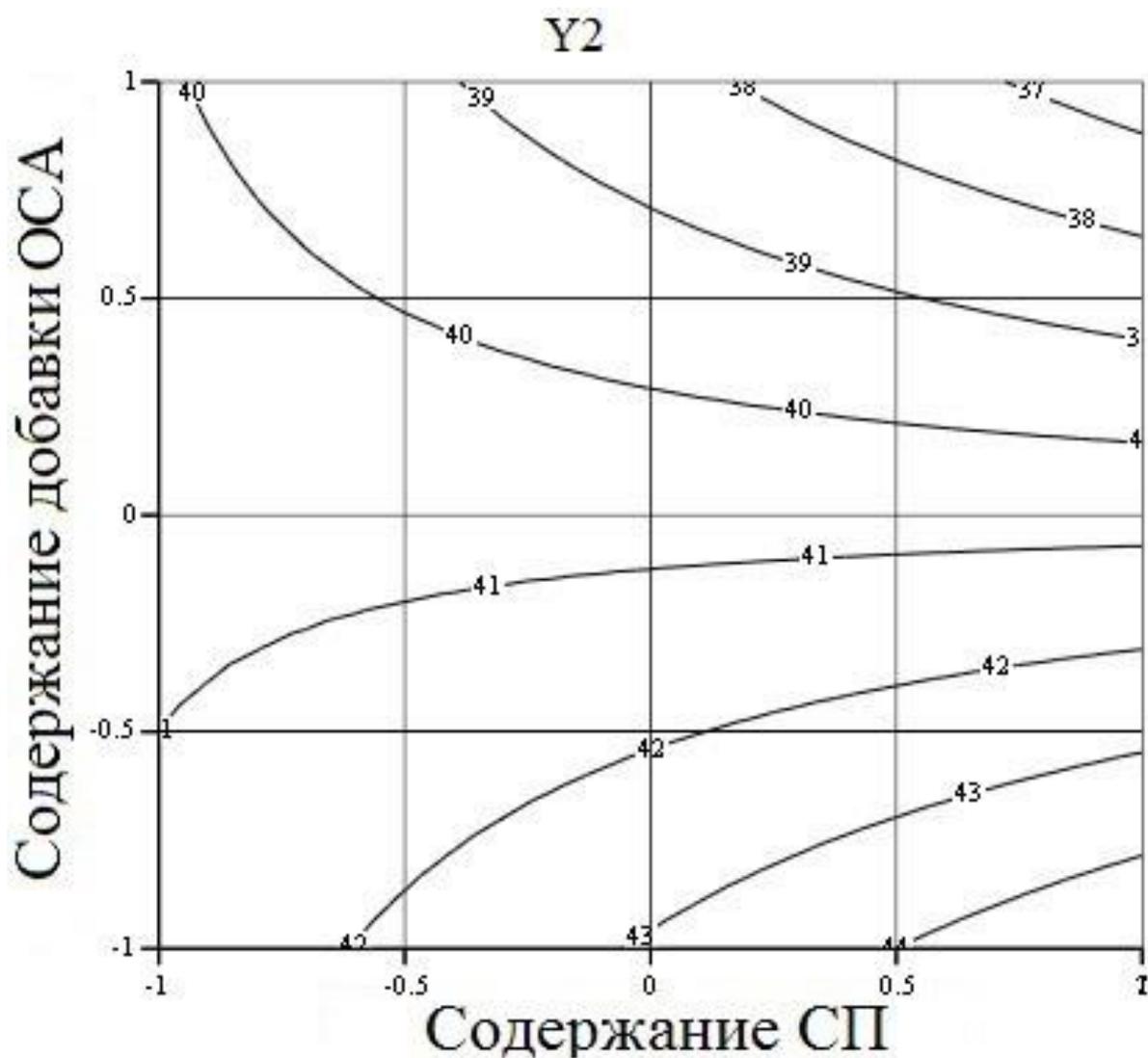


Рис. 4.5. Графическая интерпретация уравнения регрессии (4.6), характеризующего изменение предела прочности при сжатии в возрасте 28 суток от действующих факторов (X_1 , X_2).

Область оптимальных составов комплексного модификатора с расширяющей добавкой ОСА представлена на рисунке 4.6.

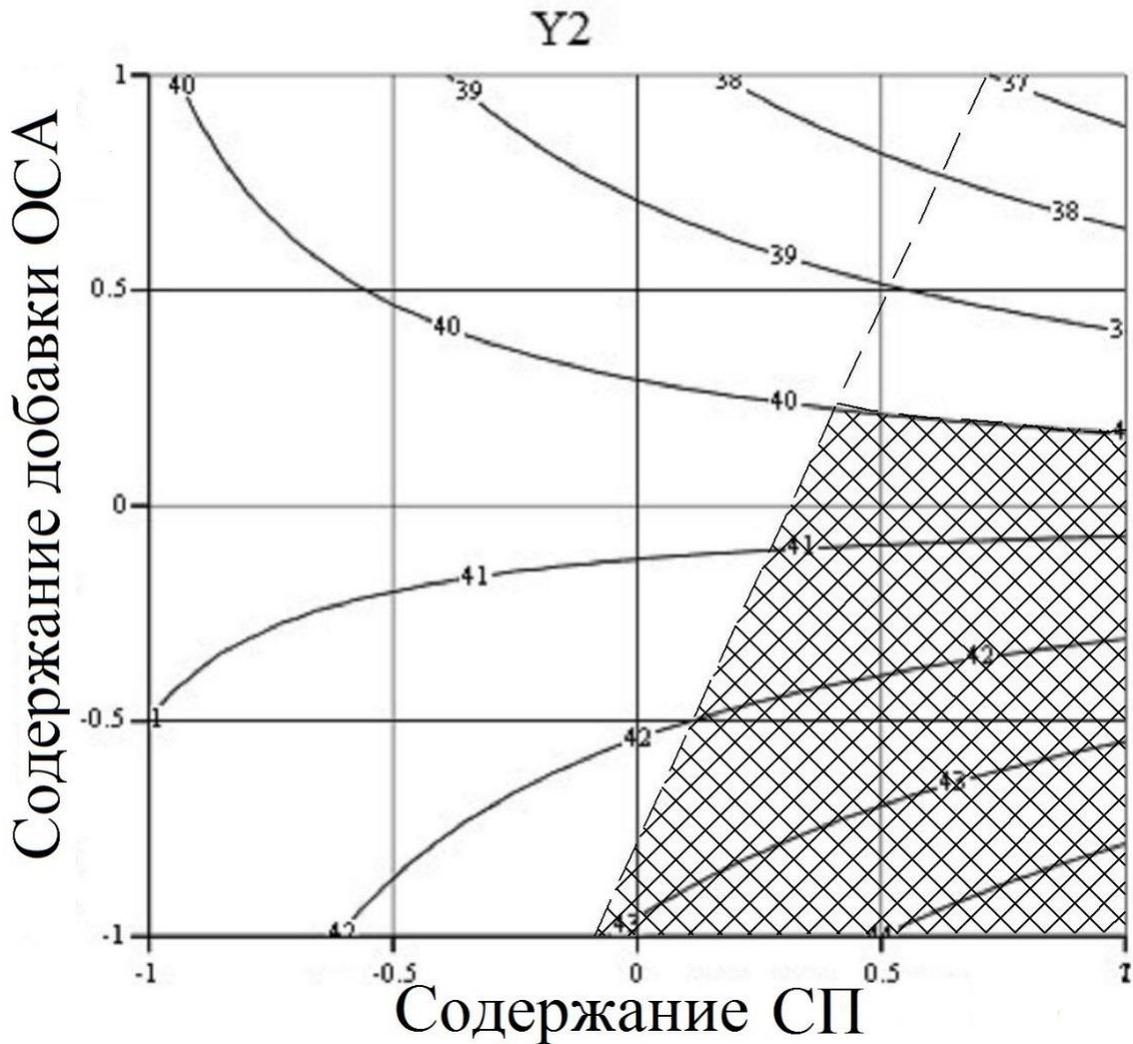


Рис. 4.6 Область оптимальных составов тяжелого цементного бетона с расширяющей добавкой ОСА

В соответствии с принятыми граничными значениями функций отклика: марка по подвижности П4 и предел прочности при сжатии бетона в проектном возрасте не менее 40 МПа, оптимальным содержанием расширяющей добавки ОСА считается 8...10,5% от массы цемента, а добавки СП – 1,3...1,5%.

4.3 Усадка модифицированных бетонов с расширяющими добавками

Для экспериментальных исследований влияния полученных модификаторов, принятых для исследований на деформационные свойства бетона, были разработаны составы согласно таблицы 3.13, пункта 3.4, а для составов №5-8 были внесены изменения, учитывая полученные результаты оптимизации расхода расширяющей добавки и суперпластификатора (рисунок 4.3, 4.6). Для образцов составов как с сульфоалюминатной расширяющей добавкой (составы №5, 6) так и с оксидосульфоалюминатной (составы №7, 8) было принято вводить их в количестве 8% от массы цемента.

Таблица 4.15

Состав бетонных смесей

№	Расход компонентов, кг(л)/м ³									В/Ц
	ПЦ	П	Щ	МК	Exp	СА	ОСА	СП	SRA	
1	400	545	1175	38	-	-	-	5,2	-	0,44
2	400	545	1175	38	-	-	-	5,2	6	0,44
3	400	545	1175	38	28	-	-	5,2	-	0,44
4	400	545	1175	38	28	-	-	5,2	6	0,44
5	400	545	1175	38	-	32	-	5,2	-	0,44
6	400	545	1175	38	-	32	-	5,2	6	0,44
7	400	545	1175	38	-	-	32	5,2	-	0,44
8	400	545	1175	38	-	-	32	5,2	6	0,44

Деформации усадки определяли в соответствии с ГОСТ 24544-81 "Бетоны. Методы определения деформации усадки и ползучести". Из бетонных смесей были изготовлены призматические образцы с размерами 0,1x0,1x0,4 м, которые твердели в нормальных условиях при температуре окружающего воздуха 18-22°C и относительной влажности воздуха не ниже 90%.

Измерение усадочных деформаций образцов выполнено индикаторами часового типа ИЧ-10 на базе измерительной установки. Начальный отсчет снимался сразу после распалубки и установки образца в устройство. Далее замеры производили на следующие сутки, 3, 7, 14, 28 и в дальнейшем раз в две недели в течение всего срока испытаний до 120 дней.

Анализируя данные исследований деформации усадки, представленных на рисунке 4.7, следует отметить, что усадка наиболее характерно проявляется в бетоне контрольного состава № 1, достигая в возрасте 28 суток величины $-0,62$ мм/м, и, стабилизируясь после 70 суток, достигает $-0,70$ мм/м к 120 суткам. Введение в состав №1 добавки SRA снижает усадку в раннем возрасте до 20% и до 11% в возрасте 120 суток ($-0,62$ мм/м).

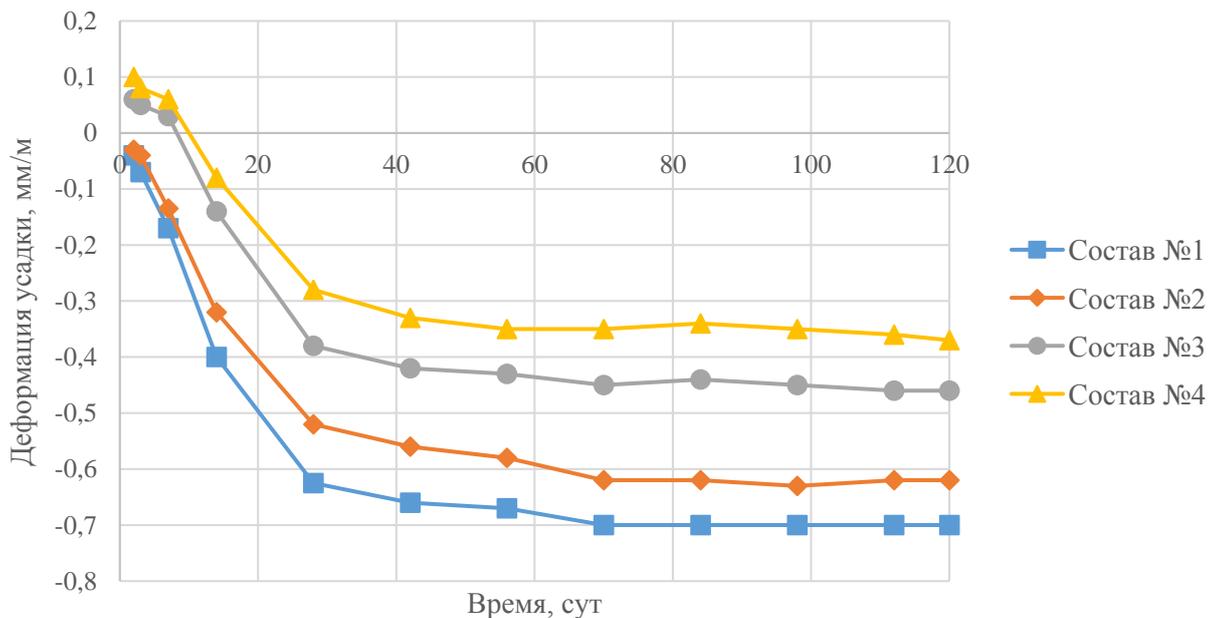


Рис. 4.7. Относительные деформации усадки образцов контрольных составов №1-2 и модифицированных составов №3-4

Установлено, что при твердении образцы-призмы бетона с расширяющим компонентом (составы №3-8) в течение трех суток показывали расширение, при этом наибольшее абсолютное значение зафиксировано для бетона, содержащего комплекс добавок "Expanscrete + SRA" (№4) – $+0,1$ мм/м, что на 25% выше, чем у

составов №6 и 8 (+0,075 мм/м). Позже происходили усадочные деформации, стабилизировавшиеся также как в контрольных составах №1 и 2 после 70 суток твердения. Усадка образцов бетона с добавкой "Ехрaнcrete" (№3) в возрасте 120 суток составляет -0,46 мм/м, что ниже чем у контрольного состава №1 на 34,3%, но выше чем у состава №4 на 19,5% (-0,37 мм/м).

Наличие в бетоне сульфoалюминатной расширяющей добавки (состав № 5) также значительно снижает величину усадки бетона в возрасте 120 суток (-0,41 мм/м), что на 41,4% ниже, чем у контрольного состава №1 (-0,70 мм/м) и на 8,7%, чем у состава №3 с фирменной добавкой "Ехрaнcrete" (-0,37 мм/м). Комплекс "СА + SRA" (состав №6) снижает деформации усадки до величины -0,35 мм/м, что в сравнении с показаниями усадки контрольного состава №2 (-0,62 мм/м) меньше на 43,5% и комплекса "Ехрaнcrete + SRA" (-0,37 мм/м) – на 5,4% (рисунок 4.8).

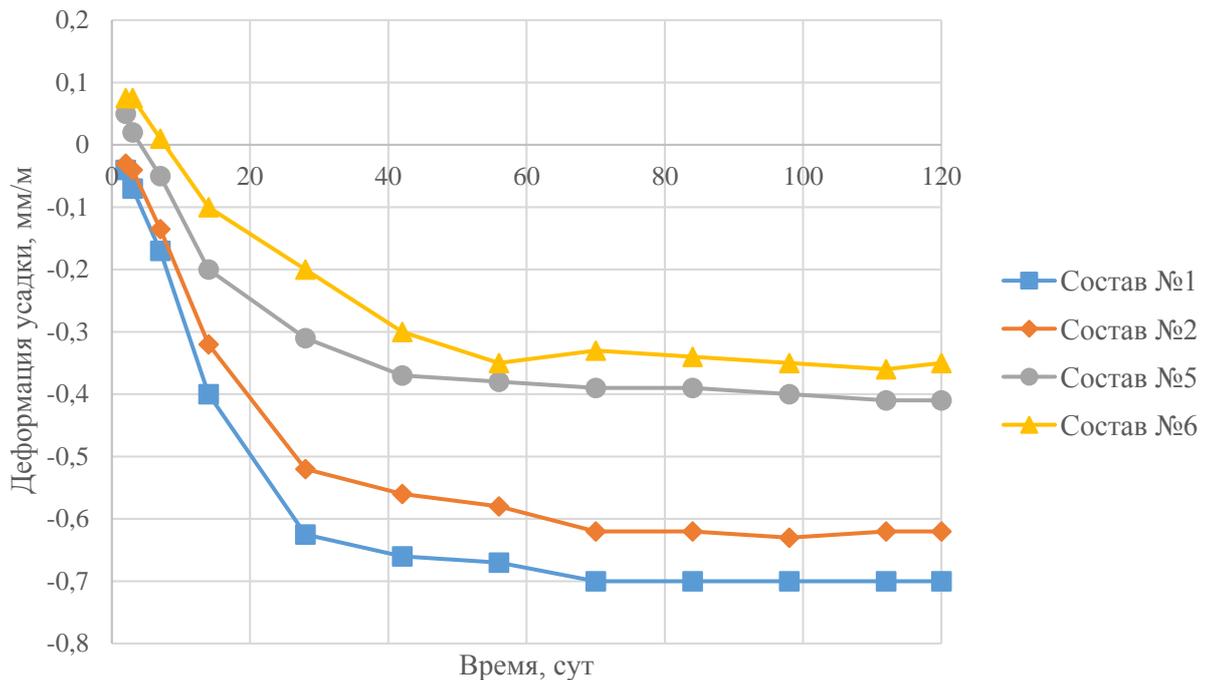


Рис. 4.8. Относительные деформации усадки образцов контрольных составов №1-2 и модифицированных составов №5-6

Деформации усадки образцов бетона, содержащих расширяющую добавку ОСА (№7), в возрасте 120 суток твердения составили -0,39 мм/м, что на 44,3%

меньше, чем показатели усадки контрольного состава №1, на 15,2% уменьшают показатели усадки в сравнении с образцами с расширяющей добавкой "Expancrete" (рисунок 4.9). В сравнении с усадочными явлениями состава с добавкой СА (№5) введение добавки ОСА снижает их на 7,1%, что очевидно связано с дополнительным оксидным компонентом в расширяющей добавке ОСА, благодаря которому начальное расширение происходит не только при образовании этtringита, но и за счет гидратации извести.

Введение добавки SRA к расширяющей добавке ОСА (№8) приводит к снижению усадки на 15,4% (-0,33 мм/м) по сравнению с составом №7 без неё. Также, отмечено, что усадка состава с комплексом "ОСА + SRA" ниже на 46,7% и 10,8%, в сравнении с составами №2 и 4 соответственно.

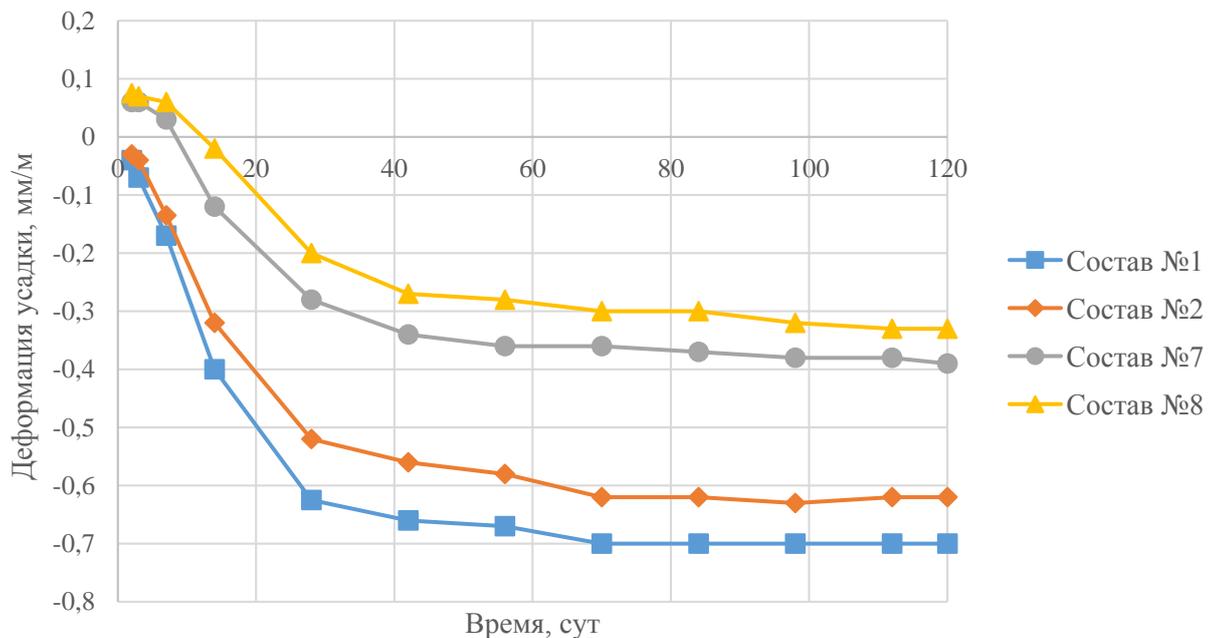


Рис. 4.9. Относительные деформации усадки образцов контрольных составов №1-2 и модифицированных составов №7-8

Подытожив вышесказанное, можно считать, что комбинированное применение расширяющих компонентов на основе сульфаталюминатной или оксидноалюминатной добавок, а также добавки SRA положительно влияет на снижение величины влажностной усадки. Расширяющие добавки

интенсифицируют процесс образования этtringита в ранние сроки твердения, вызывая при этом деформации расширения, в то время как добавка SRA, снижая поверхностное натяжение поровой жидкости, уменьшает испарение влаги из бетона, при этом понижает величину влажностной усадки, и дополнительно способствует обеспечиванию влагой реакции гидратации расширяющегося компонента.

4.4 Эксплуатационные свойства модифицированных бетонов оптимальных составов

4.4.1 Морозостойкость бетона

Для определения морозостойкости изготавливали по 18 образцов каждого состава (6 контрольных и 12 основных). После достижения 28 суток в условиях нормального твердения образцы испытывались на морозостойкость по второму ускоренному методу согласно ГОСТ 10060-2012. Метод характеризуется следующими условиями: средой при насыщении, размораживании и оттаивании служит 5%-ный водный раствор хлористого натрия, замораживание производится при температуре минус 18 ± 2 °С в воздушной среде.

Испытания проводились на образцах-кубах с размером ребра 10 см. Количество циклов замораживания и оттаивания согласно ГОСТ 10060-2012 составило 110. Критериями морозостойкости являются: снижение прочности бетона не более 5%, и снижение массы не более 2%, а также отсутствие внешних признаков разрушений (отсутствие трещин, шелушения поверхностного слоя, сколов).

Результаты испытаний приведены в таблице 4.16.

Результаты испытаний образцов бетона на морозостойкость

№ составов	Критерии морозостойкости бетона													
	приrost (+), снижение (-) предела прочности при сжатии при попеременном замораживании-оттаивании, %							снижение массы, %						
	Количество циклов													
	8	13	20	30	45	75	110	8	13	20	30	45	75	110
1	+1,9	+0,9	-1,9	-3,5	-5,4	-	-	0	0	0	0	0,2	-	-
2	+1,6	+0,5	-2,1	-3,9	-5,2	-	-	0	0	0	0	0,4	-	-
3	+4,0	+1,9	+0,6	-1,8	-3,8	-5,1	-	0	0	0	0	0	0,1	-
4	+3,5	+1,4	+0,3	-2,0	-4,0	-5,4	-	0	0	0	0	0	0,3	-
5	+3,9	+2,7	+1,1	-1,3	-2,6	-4,5	-5,6	0	0	0	0	0	0	0,8
6	+3,6	+2,3	+0,7	-1,6	-2,9	-4,7	-6,0	0	0	0	0	0	0	1,0
7	+4,1	+2,5	+1,3	-1,1	-2,5	-4,2	-5,5	0	0	0	0	0	0	0,5
8	+3,5	+2,0	+0,9	-1,4	-3,0	-4,5	-6,2	0	0	0	0	0	0	0,7
№ составов	Визуальные критерии морозостойкости бетона													
	Визуальные признаки разрушения (трещины, шелушение, сколы)													
	8	13	20	30	45	75	110							
1	отсутствуют							шелушение						
2	отсутствуют							поверхностного слоя						
3	отсутствуют							шелушение						
4	отсутствуют							поверхностного слоя						
5	отсутствуют							шелушение						
6	отсутствуют													
7	отсутствуют													
8	отсутствуют													

По данным таблицы 4.17 установлено, что введение расширяющих добавок как "Expancrete", так и СА/ОСА положительно сказывается на показателях морозостойкости и повышает её марку по сравнению с контрольными составами №1, 2. Это объясняется тем, что гидросульфат алюмината кальция, способствуя заполнению и уплотнению микропор, тем самым обеспечивает непроницаемость структуры и как следствие бетоны с расширяющими добавками имеют мелкопористую структуру с небольшим объемом капиллярных пор, что

положительно сказывается на повышение морозостойкости и водонепроницаемости таких бетонов.

Таблица 4.17

Установление марки модифицированных бетонов по морозостойкости

№ состава	Наименование добавки	Марка по морозостойкости, F (ускоренный метод)
1	-	F150
2	SRA	F150
3	Expancrete	F200
4	Expancrete + SRA	F200
5	CA	F300
6	CA + SRA	F300
7	OCA	F300
8	OCA + SRA	F300

4.4.2 Водонепроницаемость бетона

Водонепроницаемость модифицированных бетонов определялась в соответствии с требованиями ГОСТ 12730.5-84 "Бетоны. Методы определения водонепроницаемости" по методу «мокрого пятна» на серии образцов-цилиндров диаметром 150 мм и высотой 100 мм в возрасте 28 суток нормального твердения (рисунок 4.10). Давление при испытании повышалось ступенчато на 0,2 МПа через 12 часов. Водонепроницаемость серии образцов оценивалась по максимальному давлению воды, при котором на четырех из шести образцов не наблюдалось просачивание воды.



Рис. 4.10 Установка для определения водонепроницаемости образцов бетона

Составы бетонов, из которых изготавливались образцы, приведены в таблице 4.15.

Результаты испытаний приведены в таблице 4.18.

Таблица 4.18

Показатели испытаний образцов модифицированных бетонов на водонепроницаемость

№ состава	Наименование добавки	Марка по водонепроницаемости, W
1	-	W2
2	SRA	W2
3	Expancrete	W4
4	Expancrete + SRA	W4
5	CA	W6
6	CA + SRA	W6
7	OA	W6
8	OA + SRA	W6

В результате испытаний установлено, что водонепроницаемость бетонов при введении расширяющих добавок повышается по сравнению с контрольными составами №1, 2. Применение добавки "Expancrete" и комплекса "Expancrete + SRA" повышает марку бетона по водонепроницаемости с W2 до W4, а расширяющие добавки CA/OCA и их комплексы "CA + SRA" / "OCA + SRA" до W6.

Выводы по разделу 4

1. По результатам выполненной оптимизации состава тяжелого цементного бетона, модифицированного расширяющей сульфоалюминатной добавкой установлено, что для обеспечения подвижности бетонной смеси в диапазоне 16...21 см, предела прочности при сжатии бетона в проектном возрасте не менее 40 МПа, область оптимальных составов находится в следующих пределах:

- содержание расширяющей сульфоалюминатной добавки 8...11 % от массы цемента;

- содержание поликарбоксилатного суперпластификатора «MasterGlenium 115» – 1,3...1,5 %.

2. По результатам выполненной оптимизации состава тяжелого цементного бетона, модифицированного расширяющей оксидноалюминатной добавкой было установлено, что для обеспечения марки бетонной смеси по подвижности П4 и предела прочности при сжатии бетона в проектном возрасте не менее 40 МПа, область оптимальных составов находится в следующих пределах:

- содержание расширяющей оксидносульфоалюминатной добавки 8...10,5 % от массы цемента;

- содержание поликарбоксилатного суперпластификатора «MasterGlenium 115» – 1,3...1,5 %.

3. Показано, что введение расширяющих добавок снижает величину деформации усадки за счёт проявляющегося процесса расширения, вызванного повышенным образованием этtringита в раннем возрасте твердения. По сравнению с контрольным составом №1 (-0,70 мм/м) применение расширяющей добавки "Expancrete" (состав №3) снижает усадку в возрасте 120 суток на 34,3% (-0,46 мм/м), добавки СА (состав №5) – на 41,4% (-0,41 мм/м), а введение добавки ОСА (состав №7) – на 44,3% (-0,39 мм/м).

4. Выявлено, что наименьшее значение усадки в возрасте 120 суток нормального твердения показывает состав №8 с комплексом добавок "ОА + SRA" (-0,33 мм/м), что на 15,4% ниже по сравнению с составом №7 без добавки SRA (-0,39 мм/м), а также на 52,8% и на 46,7% ниже чем у контрольных составов №1 (-

0,70 мм/м) и №2 (-0,62 мм/м) соответственно, т.е. комбинированное применение расширяющих компонентов с добавкой, снижающую усадку – SRA, приводит к синергетическому эффекту снижения величины деформаций усадки.

5. Установлено, что применение сульфоалюминатных или оксидосульфоалюминатных расширяющих добавок положительно влияет на эксплуатационные свойства модифицированных бетонов: повышает марку бетона по морозостойкости с F150 до F300, а по водонепроницаемости с W2 до W6.

6. Так как, прочность при сжатии, морозостойкость, водонепроницаемость, показатели усадочных деформаций у составов с расширяющими добавками равноценны, то наиболее приемлемы по технико-экономическим показателям составы №5, 7, содержащие добавки СА и ОСА соответственно.

РАЗДЕЛ 5

ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВО ТЯЖЕЛЫХ БЕТОНОВ С Пониженной Усадкой

5.1 Инструкция по приготовлению бетонных смесей для тяжелых бетонов с пониженной усадкой на основе комплексного модификатора

5.1.1. Общие положения

1. Настоящая инструкция разработана для использования на производственной базе ООО «Торговая компания «СБМ» при приготовлении бетонных смесей для тяжелых бетонов с пониженной усадкой на основе комплексных модификаторов.

2. Изготовление указанных бетонных смесей следует производить после соответствующей модернизации бетонно-растворного узла, заключающейся в установке дополнительных расходных емкостей, дозаторов для составляющих комплексных модификаторов и промежуточного бункера.

3. Инструкция разработана на основе действующих нормативно-технических документов, проектно-сметной документации, принятых на ООО «Торговая компания «СБМ», и реальных производственных условий этого предприятия.

4. Инструкция является основным технологическим документом при изготовлении подвижных бетонных смесей ($ОК=16...21$ см) для устройства полов промышленных зданий, аэродромных покрытий, автомобильных стоянок и других подобных бетонных объектов.

5. Инструкция является основным техническим документом, в котором отражены основные необходимые сведения о применяемых сырьевых материалах, по оснащению производственной базы основным технологическим оборудованием, требованиям к бетонным смесям и тяжелым бетонам с пониженной усадкой, указаниям по составу и приготовлению бетонных смесей, их

контролю качества, нормам по технике безопасности и охране окружающей среды, правилам транспортирования и приемки на строительной площадке.

4. В инструкцию могут быть внесены изменения и дополнения.

5.1.2. Область применения

1. Настоящая инструкция распространяется на готовые для применения бетонные смеси для тяжелых бетонов с пониженной усадкой на основе комплексных модификаторов, отпускаемые потребителю для возведения монолитных и сборно-монолитных конструкций или используемые на предприятиях для изготовления изделий и сборных бетонных и железобетонных конструкций.

2. Настоящая инструкция содержит требования к технологическим характеристикам бетонных смесей, процедурам контроля их приготовления, оценке соответствия показателей их качества.

5.1.3. Нормативные ссылки

В настоящей инструкции использованы ссылки на следующие нормативно-технические документы:

ГОСТ 10060-2012 "Бетоны. Методы определения морозостойкости"

ГОСТ 10181-2014 "Смеси бетонные. Методы испытаний"

ГОСТ 12.1.004-91 "Пожарная безопасность. Общие требования"

ГОСТ 12.1.005-88 "ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны"

ГОСТ 12.1.018-93 "ССБТ. Пожаровзрывобезопасность статического электричества. Общие требования"

ГОСТ 12.1.019-2017 "Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты (с Поправкой)"

ГОСТ 12.3.009-76 "ССБТ. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования безопасности (с Изменением N 1)"

ГОСТ 12.4.028-76 "ССБТ. Респираторы ШБ-1 "Лепесток. Технические условия (с Изменениями N 1, 2)"

ГОСТ 12.4.253-2013 "Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты глаз. Общие технические требования"

ГОСТ 12.4.261.2-2014 (ISO 11933-2:1987) "Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства индивидуальной защиты рук. Перчатки камерные. Общие технические требования"

ГОСТ 12.4.280-2014 "Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Одежда специальная для защиты от общих производственных загрязнений и механических воздействий. Общие технические требования"

ГОСТ 12730.5-2018 "Бетоны. Методы определения водонепроницаемости"

ГОСТ 13087-2018 "Бетоны. Методы определения истираемости"

ГОСТ 18105-2018 "Бетоны. Правила контроля и оценки прочности"

ГОСТ 23732-2011 "Вода для бетонов и растворов. Технические условия"

ГОСТ 24211-2008 "Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия (с Изменением N 1) (с Поправкой)"

ГОСТ 24544-81 "Бетоны. Методы определения деформации усадки и ползучести (с Изменением N 1)"

ГОСТ 27006-2019 "Бетоны. Правила подбора состава"

ГОСТ 30459-2008 "Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности"

ГОСТ 31108-2016 "Цементы общестроительные. Технические условия"

ГОСТ 4013-2019 "Камень гипсовый и гипсоангидритовый для производства вяжущих материалов. Технические условия"

ГОСТ 7473-2010 "Смеси бетонные. Технические условия"

ГОСТ 8267-93 "Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия"

ГОСТ 8269.0-97 "Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний (с Изменениями N 1, 2, с Поправкой)"

ГОСТ 8735-88 "Песок для строительных работ. Методы испытаний (с Изменениями N 1, 2, с Поправкой)"

ГОСТ 8736-2014 "Песок для строительных работ. Технические условия"

ГОСТ 9179-2018 "Известь строительная. Технические условия"

ГОСТ Р 58577-2019 "Правила установления нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ проектируемыми и действующими хозяйствующими субъектами и методы определения этих нормативов"

ГОСТ Р 58894-2020 "Микрокремнезем конденсированный для бетонов и строительных растворов. Технические условия"

СанПиН 2.1.5.980-00 "Гигиенические требования к охране поверхностных вод".

СанПиН 2.2.4.548-96 "Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений"

СНиП 12-03-2001 "Безопасность труда в строительстве. Часть 1. Общие требования"

СНиП 12-04-2002 "Безопасность труда в строительстве. Часть 2. Строительное производство"

СНиП 82-02-95 "Федеральные (типовые) элементные нормы расхода цемента при изготовлении бетонных и железобетонных изделий и конструкций"

СП 60.13330.2016 "Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003 (с Изменением N 1)"

5.1.4. Требования к материалам для приготовления бетонных смесей

1. В качестве вяжущего материала следует применять портландцемент типа ЦЕМ I 42,5Н соответствующего требованиям ГОСТ 31108-2016 "Цементы общестроительные. Технические условия". Начало схватывания цемента должно

наступать не ранее 2-х часов от начала перемешивания бетонной смеси, по согласованию с потребителем допускаются и другие сроки схватывания.

Рекомендуется применение портландцемента производства Новороссийского цементного комбината.

2. Крупный заполнитель в виде щебня должен отвечать общим требованиям к заполнителям для тяжёлых бетонов по ГОСТ 8267-93 "Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия". Максимальный размер щебня назначают из условий минимальной толщины изделия и расстояний между стержнями арматуры.

3. В качестве мелкого заполнителя для бетонной смеси следует использовать природный кварцевый песок с модулем крупности 1,3-2,5, отвечающий требованиям ГОСТ 8736-2014 "Песок для строительных работ. Технические условия". Наряду с природным песком возможно применение песка из отсеков дробления. При этом необходимо предъявлять требования к марке по прочности исходной породы. Она должна быть не менее 800.

4. Активная минеральная добавка – микрокремнезём, который представляет собой тонкодисперсный порошкообразный материал серого цвета с насыпной плотностью 350-550 кг/м³, удельной поверхностью не менее 12000 м²/кг, должен соответствовать требованиям ГОСТ Р 58894-2020 "Микрокремнезем конденсированный для бетонов и строительных растворов. Технические условия".

5. В качестве минеральной расширяющей добавки следует применять 2 варианта компонентов: сульфоалюминатная – смесь шамотно-каолиновой пыли и гипса, оксидноалюминатная - смесь шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести.

6. Шамотно-каолиновая пыль принимается как алюминатный компонент расширяющей добавки и характеризуется следующим химическим составом и свойствами (таблице 5.1)

Химический состав и свойства шамотно-каолиновой пыли

Содержание оксидов, %							ППП	Насыпная плотность, кг/м ³	Удельная поверхность, м ² /кг
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃			
51,0	37,3	1,05	0,31	0,16	0,15	0,05	2,5	450-700	400-500

7. Сульфатным компонентом расширяющей добавки выступает двухводный гипс в виде порошка с насыпной плотностью 900-1100 кг/м³, отвечающий требованиям ГОСТ 4013-2019 "Камень гипсовый и гипсоангидритовый для производства вяжущих материалов. Технические условия".

8. Оксидным компонентом принята порошкообразная известь с насыпной плотностью 500-700 кг/м³, соответствующая требованиям ГОСТ 9179-2018 "Известь строительная. Технические условия".

9. С целью улучшения технологических и эксплуатационных свойств следует применять суперпластификатор MasterGlenium 115 производства немецкого концерна BASF на основе эфира поликарбоксилата, представляющий собой жидкость светло-желтого цвета плотностью 1,05...1,09 кг/л, который должен соответствовать требованиям ГОСТ 24211-2008 "Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия".

10. Вода для затвердения бетонной смеси должна соответствовать требованиям ГОСТ 23732-2011 "Вода для бетонов и растворов. Технические условия", для чего возможно использовать водопроводную воду, а также любую другую воду. Водородный показатель pH должен быть не менее 4, содержание сульфатов – не более 2700 мг/л (в пересчёте на SO₃), а также всех солей – не более 5000 мг/л.

5.1.5. Проектирование и подбор состава бетонных смесей

1. Цементные бетонные смеси должны изготавливаться в соответствии с требованиями ГОСТ 7473-2010 "Смеси бетонные. Технические условия".

2. Подбор состава бетона должен обеспечить достижение установленных показателей качества при минимальных затратах цемента и включает назначение номинального состава, расчёта и корректировки рабочего состава, и передачу на производство рабочих дозировок.

3. Подбор состава заключается в определении рационального соотношения между компонентами бетонной смеси в соответствии с предъявляемыми требованиями:

- к прочности бетона в соответствии с установленными классами по прочности;

- к подвижности (жёсткости) бетонной смеси;

- к объёму вовлечённого воздуха в свежееуложенной бетонной смеси;

- к марке бетона по морозостойкости (при необходимости).

4. Подбор состава на 1 м³ бетона производится с расчётом по формулам и таблицам по ГОСТ 27006-2019 "Бетоны. Правила подбора состава" и с последующим уточнением экспериментальным путём в следующем порядке:

- определяется расчётным путём ориентировочно водоцементное отношение, необходимое для получения заданной прочности бетона при сжатии;

- назначается в зависимости от требований к бетону водопотребность бетонной смеси принятой подвижности (жёсткости) на основе таблиц и графиков в рекомендуемой литературе;

- рассчитывается по величине водопотребности и водоцементного отношения содержание цемента с учётом требований СНиП 82-02-95 "Федеральные (типовые) элементные нормы расхода цемента при изготовлении бетонных и железобетонных изделий и конструкций";

- назначается коэффициент раздвижки зёрен крупного заполнителя K_p раствором и определяется содержание крупного заполнителя;

- рассчитывается содержание песка;

- рассчитывается необходимое количество химических и минеральных добавок в зависимости от расхода цемента;

- состав уточняется экспериментально в лабораторных условиях.

5. Экспериментально уточнённый состав бетона является номинальным, так как в нём не учтена влажность заполнителей, чтобы получить рабочий состав бетона. Рабочий состав бетона (содержание воды) корректируют с учётом концентрации водных растворов химических добавок и влажности заполнителей.

6. Ориентировочные составы бетонных смесей приведены в приложении.

5.1.6. Приготовление бетонной смеси

1. Приготовление бетонной смеси должно соответствовать требованиям ГОСТ 7473-2010 "Смеси бетонные. Технические условия".

2. Основными операциями технологии приготовления и транспортирования бетонных смесей являются:

- доставка и разгрузка материалов;
- подготовка материалов (цемента, заполнителей, воды и добавок);
- дозирование материалов;
- перемешивание материалов (приготовление смеси);
- выдача и транспортирование готовой смеси.

3. Функциональная технологическая схема приготовления бетонной смеси приведена на рисунке 5.1.

4. Портландцемент и микрокремнезём поступают на склад по железной дороге или автотранспортом и разгружаются в закрытые емкости – силосы пневматическим способом. Емкость силосов составляет 150 т. Цементы разных видов и марок должны храниться отдельно.

5. Партию нового цемента следует загружать в отдельный силос и хранить до получения результатов его лабораторного испытания.

6. Щебень и песок поступают на производственную базу автотранспортом и разгружаются в секции открытого склада отдельно по фракциям.

7. Площадки складирования щебня и песка должны быть выполнены из твёрдого покрытия с обеспечением водоотвода.

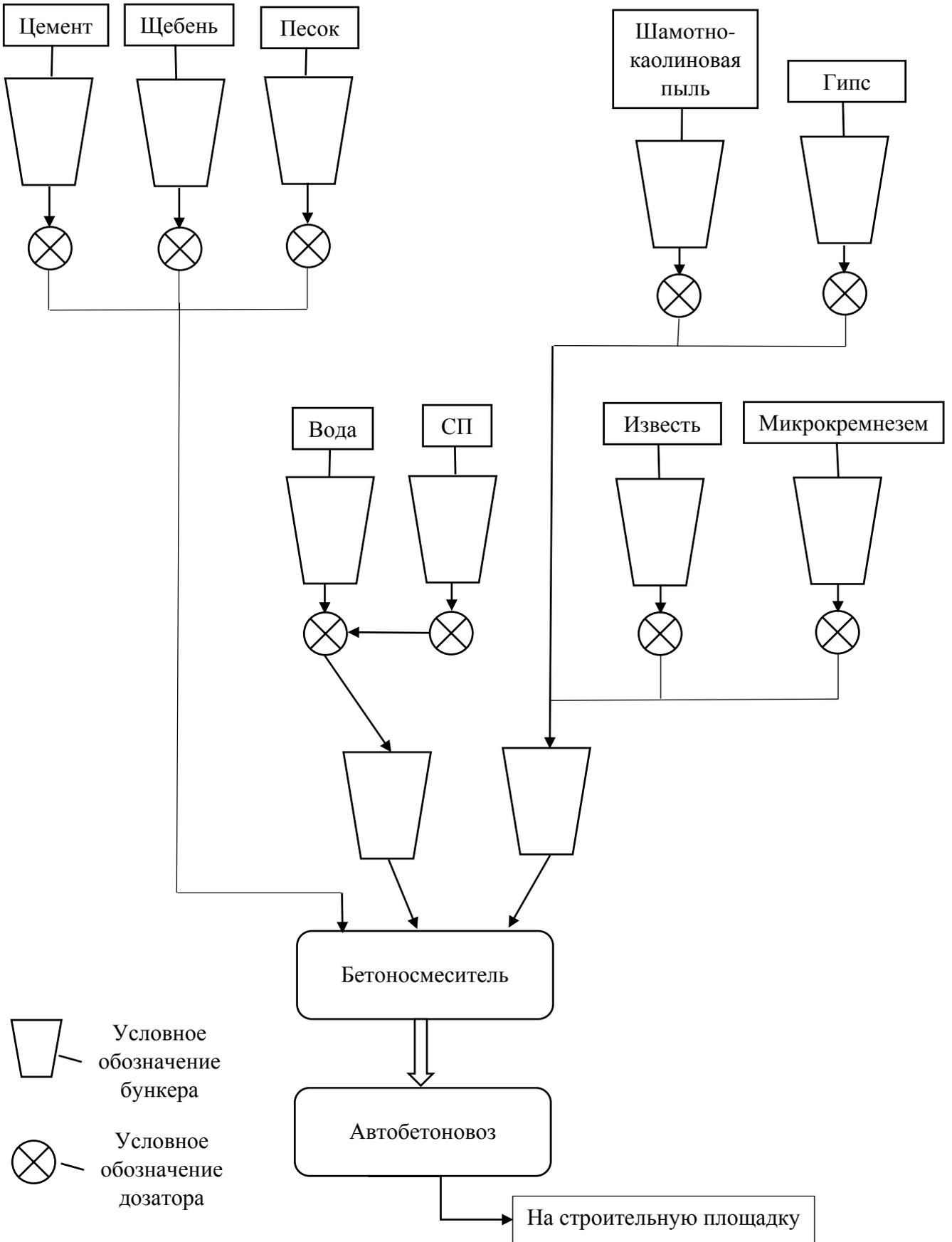


Рис. 5.1. Функциональная схема приготовления бетонной смеси

8. Жидкие добавки суперпластификаторы поступают автотранспортом в металлических емкостях, далее переливаются для хранения в специальные емкости объемом 30 и 70 л.

9. Минеральные добавки – составляющие расширяющих добавок поступают автотранспортом в мешках или пакетах. Их необходимо хранить в закрытых складах, обеспечивающих сохранение их свойств и свободную подачу в отделение подготовки добавок для последующей перегрузки в приемные бункера.

10. Подготовка материалов:

10.1. Со складов портландцемент, микрокремнезём, шамотно-каолиновую пыль, гипс и известь подают механическим способом с помощью шнека в расходные бункера, обеспечивающие сохранность их технических свойств.

10.2. При помощи фронтального погрузчика песок и щебень поступают в накопительные бункера.

10.3. В зимнее время при низкой температуре заполнители перед подачей в бетоносмесительную установку необходимо подогревать.

10.4. Допускаемая температура при загрузке в смеситель должна быть:

- для песка и щебня в диапазоне 5...40°C;
- для воды и растворов добавок в диапазоне 5...70°C.

11. Дозирование материалов

11.1. Подготовленные крупный и мелкий заполнители дозируют с корректировкой при изменении их влажности.

11.2. Для обеспечения точности дозирования необходимо перед началом каждой смены проверять исправность дозаторов и наличие на них пломб Госпроверки.

11.3. Дозирование цемента, заполнителей, твёрдых минеральных добавок осуществляют по массе. Воду и жидкие добавки допускается дозировать по массе и объёму.

11.4. Допускаемая погрешность дозирования исходных материалов приведены в таблице 5.2.

Допускаемая погрешность дозирования в процентах

Наименование материала	Допускаемая погрешность дозирования	
	По массе	По объему
Портландцемент, микрокремнезем, шамотно-каолиновая пыль, гипс, известь	+/- 2	-
Заполнители	+/- 3	-
Растворы суперпластификаторов	+/- 2	+/- 2
Вода	+/- 2	+/- 2

11.5. После автоматического дозирования цемент, песок, щебень по горизонтальному ленточному конвейеру с перегрузкой в наклонный скип направляются в бетоносмеситель периодического действия емкостью 2,5 м³.

11.6. Шамотно-каолиновая пыль, микрокремнезем, гипс и известь после дозирования направляются в приёмный бункер, расположенный перед бетоносмесителем.

11.7. После дозирования суперпластификатор вводится в дозатор воды, где затем поступающей водой, дозируемой на замес, добавка перемешивается до образования раствора рабочей концентрации и через приёмный бункер поступает в бетоносмеситель.

11.8. Щебень, песок, цемент, а затем минеральные добавки из приёмного бункера поступают в бетоносмеситель с одновременной подачей в него отдозированного количества раствора воды с суперпластификатором. Продолжительность перемешивания составляет 50 секунд.

11.9. Полученная после перемешивания бетонная смесь должна иметь заданную требуемую марку по подвижности, а её расслаиваемость не должна превышать 5 %.

11.10. С учётом температуры окружающей среды и особенностей дальнейшего применения температура при выходе из смесителя должна быть: не более 35°C. В холодное время года щебень, песок, вода перед попаданием в бетоносмеситель проходят через емкость для нагревания, где прогреваются до максимально допускаемых температур, указанных в подпункте 10.4.

11.11. При выдаче готовой бетонной смеси в транспортное средство для предотвращения её расслоения максимально допустимая высота свободного падения не должна превышать 2 м.

5.1.7. Транспортирование бетонной смеси

1. Для доставки бетонной смеси на дорожный строительный участок необходимо использовать автомобили-бетоновозы.

2. При транспортировании бетонных смесей должны исключаться возможность попадания в них атмосферных осадков, нарушения однородности, потери цементного раствора, а также обеспечиваться предохранение смеси в пути от вредного воздействия ветра и солнечных лучей.

3. Максимальная продолжительность транспортирования бетонной смеси, готовой к употреблению, при условии сохранения своих свойств не более 90 минут.

4. В процессе транспортирования введение в бетонную смесь дополнительного количества компонентов (цемента, заполнителей, воды и добавок) не допускается.

5.1.8. Контроль за производством работ

1. Бетонная смесь и бетон должны подвергаться производственному контролю под ответственность производителя.

2. Производственный контроль включает проверку:

- выбора и качества сырьевых материалов;
- проектирование состава бетона;
- технологических режимов приготовления бетонных смесей;
- методов и способов результатов испытаний материалов, бетонной смеси и бетона;
- поверку дозирующего оборудования;
- поверку оборудования для транспортирования бетонной смеси.

3. Сырьевые материалы должны отвечать требованиям пункта 5.1.4 настоящей инструкции.

4. Проектирование состава бетонной смеси следует осуществлять согласно пункта 5.1.5.

5. Точность дозаторов при взвешивании материалов следует контролировать в установленном порядке не реже 1 раз в год.

6. Приготовление бетонной смеси следует производить согласно технологических режимов, приведенных в пункте 5.1.6.

5.1.9. Контроль качества бетонной смеси и бетона

1. Бетонные смеси должны быть приняты техническим контролем изготовителя. Смеси принимают партиями. В состав партии включают бетонную смесь одного номинального состава, приготовленную на одних материалах по единой технологии. Объём партии устанавливают в зависимости от требований потребителя, но не более сменной выработки бетоносмесителя.

2. Влажность заполнителей следует контролировать не реже раза в смену согласно ГОСТ 8269.0-97 "Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний" и ГОСТ 8735-88 "Песок для строительных работ. Методы испытаний".

3. Концентрацию рабочих растворов химических добавок следует проверять не реже чем раз в смену согласно ГОСТ 30459-2008 "Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности".

4. Подвижность бетонной смеси проверяют не реже раза в смену в течение 15 мин. После выгрузки из смесителя и у потребителя не позже, чем через 20 мин. после доставки смеси. Испытания следует проводить по методике ГОСТ 10181-2014 "Смеси бетонные. Методы испытаний".

5. Расслаиваемость, объём вовлечённого воздуха и среднюю плотность бетонной смеси следует проверять не реже раза в сутки согласно нормативного документа, указанного в подпункте 4 пункта 5.1.9.

6. Прочность бетона следует проверять для каждой партии в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 18105-2018 "Бетоны. Правила контроля и оценки прочности". Прочностные показатели бетонных образцов определяют на образцах-кубах с размером ребра 0,1 м в возрасте 28 суток твердения в нормальных условиях при температуре $20\pm 2^{\circ}\text{C}$.

7. Морозостойкость бетона следует определять не реже раза в квартал в соответствии с ГОСТ 10060-2012 "Бетоны. Методы определения морозостойкости" вторым ускоренным методом в 5%-ном водном растворе хлорида натрия.

8. Водонепроницаемость бетона определяют при подборе состава бетонной смеси и далее каждые шесть месяцев согласно ГОСТ 12730.5-2018 "Бетоны. Методы определения водонепроницаемости" на образцах-цилиндрах диаметром 0,15 м, высотой 0,10 м.

9. Истираемость бетона определяют один раз в шесть месяцев согласно ГОСТ 13087-2018 "Бетоны. Методы определения истираемости" на образцах-кубах с размером ребра 0,1 м или на образцах-цилиндрах высотой 0,1 м.

10. Деформации усадки бетона следует контролировать на призматических образцах 0,1x0,1x0,4 м не реже раза в шесть месяцев согласно ГОСТ 24544-81 "Бетоны. Методы определения деформации усадки и ползучести".

11. Каждая партия бетонной смеси должна сопровождаться документом о качестве по форме согласно ГОСТ 7473-2010 "Смеси бетонные. Технические условия", в которой указываются следующие сведения:

- производитель бетонной смеси;
- потребитель;
- дата и время отгрузки бетонной смеси;
- вид бетонной смеси, её условное обозначение;
- объём бетонной смеси в партии;
- марка бетонной смеси по удобоукладываемости;

- проектный класс бетона по прочности;
- проектный класс бетона по морозостойкости;
- проектный класс бетона по водонепроницаемости;
- проектный класс бетона по истираемости;
- материалы для производства бетонной смеси;
- состав бетонной смеси.

5.1.10. Требования безопасности

1. Техника безопасности – это комплекс технических и организационных мероприятий, направленных на обеспечение безопасных условий труда путём предупреждения и устранения причин несчастных случаев. К таким мероприятиям можно отнести: разработку правил по технике безопасного проведения работ, ограждение частей машин и механизмов, которые вращаются, заземление электроприборов, постов, знание трудящимися правил по технике безопасности. Основы техники безопасности в строительстве представлены в СНиП 12-03-2001 "Безопасность труда в строительстве. Часть 1. Общие требования".

Профилактика противопожарного режима заключается в знании причин возникновения пожара, определении наиболее эффективного метода его тушения, способы и средства ликвидации за наиболее короткий срок, в строгом порядке соблюдения правил пожарной безопасности.

2. Работники, которые приняты на работу, должны проходить обучения и инструктаж по технике безопасности методов и условий труда. Повторный инструктаж проводят для всех работников не ранее одного раза в три месяца.

3. Все работы, связанные с производством бетонных смесей и дорожных одежд должны выполняться механизированным способом.

4. При приготовлении бетонной смеси необходимо следить за исправностью работы вентиляции, герметизации кабины пульта управления дозаторами и смесителями.

5. При вращении вала бетоносмесителя категорически запрещается выполнять работы, связанные с очисткой барабана, вала, лопастей, мелким ремонтом. Все работы разрешается выполнять только при полной остановке бетоносмесителя и выключенном от источника тока оборудовании, механизмов. На пульте управления должен быть вывешенный плакат: "Не включать, работают люди!".

6. Воздух рабочей зоны промышленных помещений должен отвечать требованиям ГОСТ 12.1.005-88 "ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны". Предельно допустимая концентрация (ПДК) и класс безопасности вредных веществ рабочей зоны при производстве блоков отвечают величинам, приведенным в таблице 5.3.

Таблица 5.3

ПДК и класс безопасности воздуха рабочей зоны

Наименование материала	Величина ПДК, мг/м ³	Преимущественное агрегатное состояние в условиях производства	Класс безопасности
Цемент, микрокремнезём, шамотно-каолиновая пыль, гипс, известь	6	а	IV
Химические добавки	2	а	III

7. Периодичность контроля содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны должна соответствовать ГОСТ Р 58577-2019 "Правила установления нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ проектируемыми и действующими хозяйствующими субъектами и методы определения этих нормативов". Контроль за содержанием вредных веществ и пыли в рабочей зоне должен выполняться согласно требованиям ГОСТ 12.1.005-88 "ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны".

8. Воздух рабочей зоны и микроклимат в производственных помещениях должно отвечать требованиям ГОСТ 12.1.005-88 "ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны", СанПиН 2.2.4.548-96 "Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений", СП 60.13330.2016 "Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003 (с Изменением N 1)". Относительная влажность воздуха в рабочей зоне не менее 50 %.

9. При производстве бетонной смеси должны быть обеспечены индивидуальными средствами защиты: спецодежда согласно ГОСТ 12.4.280-2014 "Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Одежда специальная для защиты от общих производственных загрязнений и механических воздействий. Общие технические требования", очками, согласно ГОСТ 12.4.253-2013 "Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты глаз. Общие технические требования", рукавицами, согласно ГОСТ 12.4.261.2-2014 (ISO 11933-2:1987) "Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства индивидуальной защиты рук. Перчатки камерные. Общие технические требования", респираторами ШБ-1, "Лепесток", согласно ГОСТ 12.4.028-76 "ССБТ. Респираторы ШБ-1 "Лепесток".

10. Работы с добавками необходимо проводить согласно СНиП 12-04-2002 "Безопасность труда в строительстве. Часть 2. Строительное производство".

11. Производство бетонной смеси должно производиться согласно ГОСТ 12.1.004-91 "Пожарная безопасность. Общие требования".

12. Электробезопасность на бетонном заводе и строительной площадке должна быть обеспечена в соответствии с СНиП 12-03-2001 "Безопасность труда в строительстве. Часть 1. Общие требования".

13. Организация строительной площадки, участков работ и рабочих мест должна обеспечить безопасность труда работающих на всех этапах производства работ.

14. Строительная площадка, участки работ и рабочие места, проезды и проходы к ним в тёмное время суток должны быть освещены в соответствии с

СНиП 12-03-2001 "Безопасность труда в строительстве. Часть 1. Общие требования". Освещение должно быть равномерным без слепящего действия приспособлений для работающих. Производство работ в неосвещённых местах не проводится.

15. У въезда на стройплощадку следует установить шлагбаумы и схемы движения транспортных средств, а на обочинах дорог хорошо видимые дорожные знаки, регламентирующие порядок движения транспорта в соответствии с "Правилами дорожного движения".

16. Скорость движения автотранспорта вблизи мест производства работ должна быть ограничена до 10 км/ч на прямых участках и 5 км/ч на поворотах.

17. Материалы следует размещать на выровненных площадках и принимать меры против самопроизвольного смешивания, просадки, осыпания и раскатывания складированных материалов.

18. Технологическое оборудование и коммуникации должны быть надёжно заземлены согласно требованиям ГОСТ 12.1.019-2017 "Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты", и ГОСТ 12.1.018-93 "ССБТ. Пожаровзрывобезопасность статического электричества. Общие требования", СНиП 12-04-2002 "Безопасность труда в строительстве. Часть 2. Строительное производство". Уровень шума в рабочей зоне и промышленных помещениях не должен превышать 80 дБ.

19. Технические и бытовые сточные воды должны сливаться в канализацию согласно требованиям СанПиН 2.1.5.980-00 "Гигиенические требования к охране поверхностных вод".

20. Погрузочно-разгрузочные работы должны выполняться согласно требованиям ГОСТ 12.3.009-76 "ССБТ. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования безопасности" и СНиП 12-04-2002 "Безопасность труда в строительстве. Часть 2. Строительное производство".

Приложение

Таблица 5.4

Ориентировочные составы

Наименование сырьевых материалов	Ед. изм.	Расход на 1 м ³ бетона
Состав с добавкой СА		
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	т	0,400
Песок	т	0,545
Щебень	т	1,175
Вода	т	0,176
Суперпластификатор MasterGlenium 115	л	5,2
Микрокремнезем	кг	38
Добавка СА:		
- шамотно-каолиновая пыль	кг	22,4
- гипс	кг	9,6
Состав с добавкой ОА		
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	т	0,400
Песок	т	0,545
Щебень	т	1,175
Вода	т	0,176
Суперпластификатор MasterGlenium 115	л	5,2
Микрокремнезем	кг	38
Добавка СА:		
- шамотно-каолиновая пыль	кг	20,8
- гипс	кг	9,6
- известь	кг	1,6

5.2 Экономическая эффективность

В разделе представлены данные о технико-экономических показателях производства бетонных смесей, модифицированных комплексным модификатором на основе расширяющей добавки, микрокремнезема и поликарбоксилатного суперпластификатора. Приводится расчет экономической эффективности при возможной реконструкции цементобетонного покрытия (объемом 560 м³) взлетно-посадочной полосы, рулежных дорожек и перрона Луганского аэропорта при использовании разработанного модификатора.

При расчетах за базовые варианты приняты состав бетона №3 (пункт 4.3, таблица 4.15) с прочностью при сжатии $R_{сжат} = 43,8$ МПа, в котором в качестве расширяющего компонента используется порошкообразная добавка «Expancrete» итальянской фирмы «Marec», состав бетона №5 (пункт 4.3, таблица 4.15) с прочностью при сжатии $R_{сжат} = 44$ МПа, где в роли расширяющего компонента принята добавка СА на основе шамотно-каолиновой пыли и гипса. а также предлагаемый состав бетона №7 (пункт 4.3, таблица 4.15) с прочностью при сжатии $R_{сжат} = 43$ МПа, в роли расширяющего компонента выступала добавка ОСА на основе шамотно-каолиновой пыли, гипса и извести.

Калькуляция стоимости сырьевых материалов на 1 м³ бетона по базовым вариантам приведена в таблице 5.4. Цены приведены по состоянию на 01.01.2021г.

Таблица 5.5

Калькуляция стоимости сырьевых материалов

Наименование сырьевых материалов	Ед. изм.	Стоимость материала, руб.	Расход на 1 м ³ бетона	Стоимость на 1 м ³ бетона
1	2	3	4	5
Состав №3				
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	т	6400	0,400	2560
Песок	т	400	0,545	218
Щебень	т	650	1,175	763,75
Вода	т	33,64	0,176	5,92
Суперпластификатор Master Glenium 115	л	230	5,2	1196
Микрокремнезем	кг	15	38	570
Expancrete	кг	100	28	2800
Итого:				8113,67

Продолжение таблицы 5.5

1	2	3	4	5
Состав №5				
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	т	6400	0,400	2560
Песок	т	400	0,545	218
Щебень	т	650	1,175	763,75
Вода	т	33,64	0,176	5,92
Суперпластификатор MasterGlenium 115	л	230	5,2	1196
Микрокремнезем	кг	15	38	570
Добавка СА:				
- шамотно-каолиновая пыль	кг	15	22,4	336
- гипс	кг	4	9,6	38,4
Итого:				5688,07
Состав №7				
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	т	6400	0,400	2560
Песок	т	400	0,545	218
Щебень	т	650	1,175	763,75
Вода	т	33,64	0,176	5,92
Суперпластификатор MasterGlenium 115	л	230	5,2	1196
Микрокремнезем	кг	15	38	570
Добавка ОСА:				
- шамотно-каолиновая пыль	кг	15	20,8	312
- гипс	кг	4	9,6	38,4
- известь	кг	7	1,6	11,2
Итого:				5675,27

Согласно данным таблицы 5.4 экономическая эффективность по показателю стоимости сырьевых материалов на 1 м³ модифицированного бетона составит:

- при замене расширяющей добавки «Ехpancrete» добавкой СА

$$\mathcal{E} = 8113,67 - 5688,07 = 2425,6 \text{ руб.}$$

- при замене расширяющей добавки «Ехpancrete» добавкой ОСА

$$\mathcal{E} = 8113,67 - 5675,27 = 2438,4 \text{ руб.}$$

Тогда общий экономический эффект при замене фирменного расширяющего компонента «Ехpancrete» на расширяющую добавку СА из местного сырья при производстве бетонной смеси объемом 560 м³ составит:

$$\mathcal{E} = 2425,6 \cdot 560 = 1358336 \text{ руб.}$$

При замене расширяющего компонента «Ехpancrete» на расширяющую добавку ОСА экономический эффект:

$$\mathcal{E} = 2438,4 \cdot 560 = 1365504 \text{ руб.}$$

Экономический эффект после модернизации бетонного узла незначительно уменьшится.

Выводы по разделу 5

1. Разработана «Инструкция по приготовлению бетонных смесей для тяжелых бетонов с пониженной усадкой на основе комплексного модификатора».

2. Выполнен расчет экономического эффекта при возможной реконструкции цементобетонного покрытия (объемом 560 м³) взлетно-посадочной полосы, рулежных дорожек и перрона Луганского аэропорта при использовании разработанного модификатора.

3. Установлено, что при замене фирменного расширяющего компонента «Ехрaнcrete» на расширяющую добавку СА из местного сырья при производстве бетонной смеси объемом 560 м³ составит 1358336 руб., а при замене на расширяющую добавку ОСА – 1365504 руб.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Теоретически и экспериментально обосновано получение составов тяжелых цементных бетонов с пониженной усадкой на основе установления закономерностей влияния состава комплексных модификаторов (два типа расширяющей добавки, активная минеральная добавка, суперпластификатор и добавка, снижающая усадку) на структурообразование и свойства бетонной смеси и бетона.

2. Установлено, что наличие в цементном тесте расширяющей добавки СА в количестве 5...15% от массы цемента снижает его начальную подвижность на 9,1...30,9%, а также добавки ОСА – на 1,82...23,64% по сравнению с контрольным составом, что связано с высокой водопотребностью компонентов добавок. Однако, по мере нарастания стерического эффекта поликарбоксилатного суперпластификатора происходит увеличение показателей подвижности теста образцов всех составов и потери подвижности в образцах с расширяющими добавками в конечном периоде ниже по отношению к контрольному составу.

3. Установлено, что введение расширяющей добавки СА или ОСА повышает проектную прочность бетона при сжатии на 3,3...16,2% и в возрасте 90 суток на 24,8...37,8% в сравнении с контрольным составом. При этом, отмечается негативное влияние добавки SRA на прочность всех составов, понижая её на 5...31% в раннем возрасте и на 5,5-9% в проектном возрасте твердения.

4. По данным рентгенофазового анализа, отмечается повышение дифракционных отражений гидроалюминатов кальция C_3AH_6 и портландита $Ca(OH)_2$ в модифицированных составах по сравнению с контрольным, что подтверждает положительное влияние мелкодисперсных расширяющих добавок на гидратацию и твердение цементного камня, так как кристаллы этtringита образуют большое число активных центров кристаллизации, способствующих увеличению количества гидратных новообразований в единице объема и формированию более плотного и прочного цементного камня.

5. Определены области оптимальных составов бетонных смесей по содержанию расширяющих добавок СА или ОСА по критериям подвижности бетонной смеси и прочности бетона при сжатии, обеспечивающие получение бетонных смесей марки по подвижности П4 и пределом прочности при сжатии в проектном возрасте не менее 40 МПа.

6. Показано, что введение расширяющих добавок снижает величину деформации усадки за счёт проявляющегося процесса расширения, вызванного повышенным образованием этtringита в раннем возрасте твердения. По сравнению с контрольным составом (-0,70 мм/м) применение расширяющей добавки "Ехpancrete" снижает усадку в возрасте 120 суток на 34,3% (-0,46 мм/м), добавки СА – на 41,4% (-0,41 мм/м), а введение добавки ОСА – на 44,3% (-0,39 мм/м). Выявлено, что наименьшее значение усадки в возрасте 120 суток нормального твердения показывает состав с комплексом добавок "ОСА + SRA" (- 0,33 мм/м), что на 15,4% ниже по сравнению с аналогичным составом без добавки SRA (-0,39 мм/м), а также на 52,8% и на 46,7% ниже чем у контрольных составов без SRA (-0,70 мм/м) и с SRA (-0,62 мм/м) соответственно, т.е. комбинированное применение расширяющих компонентов с добавкой, снижающую усадку – SRA, приводит к синергетическому эффекту снижения величины деформаций усадки.

7. Установлено, что применение расширяющих добавок СА или ОСА положительно влияет на эксплуатационные свойства модифицированных бетонов: повышает марку бетона по морозостойкости с F150 до F300, а по водонепроницаемости с W2 до W6.

8. Предполагаемый расчетный экономический эффект при частичной реконструкции цементобетонного покрытия (объемом 560 м³) взлетно-посадочной полосы, рулежных дорожек и перрона Луганского аэропорта при замене фирменного расширяющего компонента «Ехpancrete» на расширяющую добавку ОСА составит 1365504 руб.

9. Разработана инструкция по приготовлению бетонных смесей для тяжелых бетонов с пониженной усадкой на основе комплексного модификатора. Выполнено опытно-промышленное внедрение результатов диссертационной работы на ООО «Торговая компания «СБМ» (ЛНР, г. Луганск), а также внедрение в учебный процесс ИСА и ЖКХ ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Александровский С.В. К итогам Международного симпозиума по усадке бетонов / С.В. Александровский // Бетон и железобетон. 1968. №11. С. 8-9.
2. Александровский С.В. Экспериментально-теоретические исследования усадочных напряжений в бетоне / С.В. Александровский. – М.: Стройиздат, 1965. – 285 с.
3. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
4. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 368 с.
5. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Ю.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко – М: Стройиздат. – 1971. – 208 с.
6. Будников, П. П Явление расширения и сброса прочности при твердении цементов. / П.П. Будников, И.В. Кравченко // Журнал прикладной химии. – 1960. № 11. – С. 83-89.
7. Будников, П. П. Химия и свойства глиноземистого и расширяющегося цементов / П.П. Будников, И.В. Кравченко // В Кн.: Новое в химии и технологии цемента. – М., 1962. – С. 112.
8. Десов, А. Е. Некоторые вопросы структуры, прочности и деформаций бетонов [Текст] / А. Е. Десов // Структура, прочность и деформации бетона. - М.: Стройиздат, 1976. - С. 65-72.
9. Звездов, А.И. Бетон с компенсированной усадкой для возведения трещиностойких конструкций большой протяженности / А.И. Звездов, М.Ю. Титов // Бетон и железобетон. – 2001. – №4. – С. 17-19.
10. Звездов, А.И. Бетоны с компенсированной усадкой / А.И. Звездов, Г.М. Мартиросов // Бетон и железобетон. – 1995. – № 3. – С. 2-4.
11. Звездов, А.И. Железобетонные конструкции из бетона на расширяющихся цементах: автореф. дис. ... докт. техн. наук / А.И. Звездов. – М., 1997. – 47 с.

12. Калашников, В.И. Сравнительная оценка усадки цементного камня из пластифицированных и непластифицированных цементно-водных суспензий / Калашников В.И., Демьянова В.С., Борисов А.А., Бобрышев А.Н. // Современные проблемы строительного материаловедения / Пятые академические чтения РААСН. Воронеж. – 1999. – С. 312-315.

13. Калашников, В.И. Усадка и усадочная трещиностойкость цементного камня из пластифицированных и непластифицированных цементных композиций // Современные проблемы строительного материаловедения / В.И. Калашников, В.С. Демьянова, Е.Ю. Селиванова // Седьмые академические чтения РААСН. Белгород. – 2001. – С. 171-179.

14. Кузнецова Т.В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы. – М., Стройиздат, 1986. – 209 с.

15. Лермит, Р. Проблемы технологии бетона / Р. Лермит / Пер с фр. В.И. Контовт. – Под ред. и с предисл. А.Е. Десова. – Изд. 2-е. – М.: ЛКИ, 2007. – 296 с.

16. Мощанский Н.А. Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред. — М.: Госстройиздат, 1962. – 235 с.

17. Мчедлов-Петросян, О.П. Расширяющиеся составы на основе портландцемента / О.П. Мчедлов-Петросян, Л.Г. Филатов. – М.: Издательство литературы по строительству, 1965. – 139 с.

18. Несветаев, Г.В. К вопросу нормирования усадки цементных бетонов/ Г.В. Несветаев, Т.А. Щербинина // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» – Том 7, №5 – 2015. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/07TVN515.pdf>

19. Несветаев, Г.В. Усадочные деформации и раннее трещинообразование бетона / Г.В. Несветаев, С.А. Тимонов // Пятые академические чтения РААСН. Воронеж. – 1999. – С. 312-315.

20. Павлова И. П. Свойства цементных систем, модифицированных расширяющимися добавками сульфоферритного и сульфоалюминатного типа [Текст] / И. П. Павлова, К. Беломесова // Инновации в бетоне в строительстве и подготовке инженерных кадров: сборник статей по

материалам Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения И. Н. Ахвердова и С. С. Атаева, Минск, 9–10 июня 2016 г. : в 2 ч. – Ч. 1 / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: Э. И. Батяновский, В. В. Бабицкий. – Минск, 2016. – С. 153–158.

21. Титов, М. Ю. Бетоны с компенсированной усадкой на расширяющих добавках : дис. канд. техн. наук : 05.23.05 / М. Ю. Титов – Москва, 2012. – 189 с.

22. Цилосани, З.Н. Усадка и ползучесть бетона / З.Н. Цилосани. – Тбилиси.: Мецниереба, 1979. – 230 с.

23. Шейкин, А.Е. Безусадочный портландцемент. Состав, свойства и область рационального применения в строительстве / А.Е. Шейкин, Т.Ю. Якуб. – М.: Литература по строительству, 1966. – 102 с.

24. Collepardi M. Effects of shrinkage-reducing admixture in shrinkage compensating concrete / M. Collepardi, A. Borsoi, S. Collepardi, JJ. Ogoumah Olagot, R. Troli // Con-crete International. – 2005. – Vol. 27, No 10. – P. 1-8.

25. Eberhardt, A. B. On the mechanisms of shrinkage reducing admixtures in self-consolidating mortars and concretes [Text] / Arnd Bernd Eberhardt // Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor Ingenieur an der Fakultat Bauingenieurwesen der Bauhaus Universitat Weimar. – Aachen : Shaker Verlag GmbH, 2011. – 286 pp.

26. On the mechanism of plastic shrinkage cracking in fresh cementitious materials [Text] / S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, M. Plamondon, P. Lura // Cement and Concrete Research. – 2019. – Vol. 115. – P. 251–263.

27. Ахвердов, И.Н. Высокопрочный бетон / И.Н. Ахвердов – М.: Госстройиздат, 1961. – 162 с.

28. Бабаев, Ш.Т. Энергосберегающая технология железобетонных конструкций из высокопрочного бетона с химическими добавками / Ш.Т. Бабаев, А.А. Комар. – М.: Стройиздат, 1987. – 240 с.

29. Батраков, В.Г. Модификаторы бетона – новые возможности / В.Г. Батраков // Мат-лы 1-й Всерос. конф. по проблемам бетона и железобетона. – М.: Ассоциация «Железобетон», 2001. – Кн. 1. – С. 184-208.

30. Гвоздев, А.А. Прочность, структурные изменения и деформации бетона / А.А. Гвоздев. – М.: Стройиздат, 1978. – 259 с.
31. Холмянский, М.М. Бетон и железобетон. Деформативность и прочность / М.М. Холмянский. – М.: Стройиздат, 1997. — 576 с.
32. Kurdowski W. Cement and concrete chemistry / W. Kurdowski. – Springer Publ., 2014. – 700 p.
33. Несветаев, Г.В. Закономерности деформирования и прогнозирования стойкости бетона при силовых и температурных воздействиях: Дисс. ... д-р техн. наук. – Ростов н\Д., 1998. – 400 с.
34. Панченко, А.И. Обеспечение стойкости бетона к физическим воздействиям внешней среды путем управления собственными деформациями: Автореф. дисс ... д-р техн. наук / А.И. Панченко – Ростов н\Д.: РГСУ, 1996. – 35 с.
35. Несветаев Г.В., Тимонов С.А. О прогнозирование раннего трещинообразования высокопрочного бетона / Несветаев Г.В., Тимонов С.А. // Пятые академические чтения РААСН. Воронеж. 1999. – С. 305-310.
36. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия. М.: Стройиздат, 1966. – 425 с.
37. Александровский С.В., Багрий В.Я. Ползучесть бетона при периодических воздействиях внешней среды. М.: Стройиздат, 1970. – 166 с.
38. Шейкин А.В., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. – 333 с.
39. Шейкин А.Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня / А.Е. Шейкин – М.: Стройиздат, 1974. – 191 с.
40. Миненко, Е.Ю. Усадка и усадочная трещиностойкость высокопрочных бетонов с органоминеральными модификаторами : дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05. / Е.Ю. Миненко – Пенза, 2004. – 157 с.
41. Clarke C. Concrete Shrinkage Prediction Using Maturity and Activation Energy / Christopher Clarke // Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, for the degree of Master of Science, 2009. – 115 pp.

42. Hoff G.C. The use of lightweight fines for the internal curing of concrete / G.C. Hoff // Report prepared for Northeast Solite Corporation: Mississippi, Clinton: Hoff Consulting LLC. – August 20, 2002. – 44 pp.

43. Биби, Э. В. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 2 : Проектирование железобетонных конструкций : руководство для проектировщиков к EN 1992-1-1 и EN 1992-1-2. Еврокод 2 : Проектирование железобетонных конструкций. Общие правила и правила для зданий. Противопожарное проектирование строительных конструкций / Э.В. Биби, Р.С. Нараянан ; ред. серии Х. Гульванесян ; М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит, ун-т» ; науч. ред. пер. В.О. Алмазов, А.И. Плотников. – Москва : МГСУ, 2012. - 292 с.

44. Powers, T.C. Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste / T.C Powers, T.L. Brownyard // JACI. – 1980. – v.77. – №4. – pp. 264-268.

45. Рамачандран В. Наука о бетоне [Текст] / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн. – М.: Стройиздат, 1986. – 278 с.

46. Lea, F.M. The Chemistry of Cement and Concrete / F.M. Lea. - New York: Chemical Publishing Company Inc, 1971. – 397p.

47. Воробьев А.А. Деформативность растворов, пропитанных нефтепродуктами / А.А. Воробьев, Саид Мохамад Саид // Бетон и железобетон. – 2004. – №1. – С. 11-13.

48. Mora Ruacho, J. Influence of shrinkage reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete [Текст] / J. Mora Ruacho, R. Gettu, A. Aguado // Cement and Concrete Research. – 2009. – Vol. 39. – P. 141–146.

49. Жуков, В.В. Свойства бетона с шунгитовыми заполнителями при нормальных и высоких температурах / Жуков В.В., Баленко И.Ф. // Бетон и железобетон. 1987. №7. С16-17.

50. Краснов А.М. Усадочные деформации высоконаполненного высокопрочного мелкозернистопесчанного бетона / Краснов А.М. // Бетон и железобетон. – 2001. – №7. – С. 8-11.

51. Ананенко А.А. Влияние условий хранения образцов на деформативные свойства бетонов, изготовленных на цементах разного состава / Ананенко А.А. // Известия вузов. 1999. №9. С. 43-46.
52. Якобсон, К.К. Упругие и усадочные деформации высокопрочного бетона на цементах различных составов / Якобсон К.К., Нижевясов В.В. // Тр. НИИЖТа. Новосибирск, 1968. – С. 134-145.
53. Рояк, С. М. Специальные цементы / С. М. Рояк, Г. С. Рояк. – М.: Стройиздат, 1983. – 279 с.
54. Демьянова, В.С. Методологические и технологические основы производства высокопрочных бетонов с высокой ранней прочностью для беспрогревных и малопроевных технологий: Автореф. дисс. д-р техн. наук. / В.С. Демьянова – Пенза, 2003. – 43 с.
55. Титов, М. Ю. Бетоны с повышенной прочностью на основе расширяющих добавок / М. Ю. Титов. // Строительные материалы. – 2012. – №2. – С. 84–87.
56. Специальные цементы / [Т. В. Кузнецова, М. М. Сычев, А. П. Осокин и др.]. – СПб: Стройиздат СПб, 1997. – 314 с.
57. Тур, В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона / В.В. Тур – Брест: Изд. БрПИ, 1998. – 244 с.
58. Troli R. Shrinkage-Compensating Concretes for Special Structures / R. Troli, M. Collepardi // 4th Intern. Conf. on "Non-Traditional Cement & Concrete", 27-30 June 2011: Proc. – Brno (Czech Republic), 2011. – 20 pp.
59. Егорочкина И.О. Структура и свойства бетонов с комплексной усадкой на вторичных заполнителях: Автореф. дисс. канд. тех. наук. / И.О. Егорочкина – Ростов н/Дону. – 1998. – 18 с.
60. Kawano, T. Product based on CaO as expansive agent [Текст] / Т. Kawano // Gypsum – S – Lime. – 1972. – № 121. – P. 11–16.
61. Елсуфьева М.С. Расширяющийся сталефибробетон повышенной трещиностойкости: дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / М.С. Елсуфьева – Москва, 2016 – 124 с.

62. Красильников, К.Г. Физико-химия собственных деформаций цементного камня / К.Г. Красильников, Л.В. Никитина, Н.Н. Скоблинская. – М.: Стройиздат, 1980. – 256 с.

63. Маршди К. Модифицированный дорожный цементный бетон в условиях жаркого климата [Текст] : дис. канд. техн. наук : 05.23.05 / Маршди Косай Сахиб Ради – Харьков, 2015. – 179 с.

64. Красильников К.Г. Расширяющийся портландцемент с добавкой СаО / К.Г. Красильников, Л.В. Никитина, А.И. Лапшина // Физико-химические исследования цементного камня и бетона. Труды НИИЖБ. – М., – 1972, – вып 7.

65. Красильников, К.Г. Деформации расширения при твердении портландцемента с добавкой СаО / К.Г. Красильников, А.И. Лапшина, Л.В. Никитина // В кн.: Технология и повышение долговечности железобетонных конструкций. – М.:1972. – С. 37-51.

66. Кравченко, И. В. Химия и свойства сульфатированных расширяющихся цементов: автореф. дис ... канд. техн. наук / И.В. Кравченко. – М., 1962. – 24 с.

67. Никитина, Л.В. Фазовые превращения этtringита в расширяющихся системах / Л.В. Никитина, З.М. Ларионова, А.И. Лапшина // Физико-химические исследования бетонов и их составляющих: Труды НИИЖБ. М., 1975. – вып. 17.

68. Patent 4452637 Japan, C04b 7/35. Expansive cement additive and cementitious material added therewith [Text] / Yuichi Suzukawa, Waichi Kobayashi, Shigeo Okabayashi, Hidefumi Ichinose ; original assignee Ube Industries Ltd. – №457,683 ; filed 13.01.1983 ; published 05.06.1984. – 5 p.

69. Patent 3801339 Japan, C04b 13/22. Expansive additive for lime cement and process for the preparation of the same [Text] / Hirokatsu Ogura, Tatsuo Takizawa, Yoshizo Ono, Yukuo Taketsume ; original assignee Denka Co Ltd. – №169,811 ; filed 06.08.1971 ; published 02.04.1974. – 5 p.

70. Patent 3510326 Japan, C04b 7/04, 7/32. Expensive cement and method of production of such cement [Text] / Minoru Miki ; original assignee Minoru Miki. – № 602,356 ; filed 06.12.1966 ; published 05.05.1970. – 8 p.

71. Patent 3666515 Japan, C04b. Process for the production of cement expansive additives [Text] / Kozi Nakagawa ; original assignee Denka Co Ltd. №46,363 ; filed 15.06.1970 ; published 30.05.1972. – 5 p.

72. Self-Curing, Shrinkage-Free Concrete / M. Collepardi, A. Borsoi, S. Collepardi, R. Troli, M. Valente // Seventh CANMET/ACI Intern. Conf. on Durability of Concrete, 29 May – 2 June 2006: Proc. – Montreal (Canada), 2006. – P. 755-764.

73. Canpolat F. SRAs – RECENT STUDIES. Report No. CBU-2003-50, REP-543 / F. Canpolat, T.R. Naik // the University of Wisconsin – Milwaukee: Department of Civil Engineering and Mechanics College of Engineering and Applied Science. – December 2003. – 18 pp.

74. Xu L. Dolomite used as raw material to produce MgO-based expansive agent / Xu Lingling, Deng Min // Cement and Concrete Research. – 2005. – Vol. 35. – P. 1480-1485.

75. Mora-Ruacho J. Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete // J. Mora-Ruacho, R. Gettu, A. Aguado // Cement and Concrete Research. – 2009. – Vol. 39. – P. 141-146.

76. Palacios M. Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes / M. Palacios, F. Puertas // Cement and Concrete Research. – 2007. – Vol. 37. – P. 691-702.

77. Palacios M. Effect of superplasticizer and shrinkage-reducing admixtures on alkali-activated slag pastes and mortars / M. Palacios, F. Puertas // Cement and Concrete Research. – 2005. – Vol. 35. – P. 1358-1367.

78. Beltzung F. Role of disjoining pressure in cement based materials / F. Beltzung, F.H. Wittmann // Cement and Concrete Research. – 2005. – Vol. 35, No. 12. – P. 2364-2370.

79. Collepardi M. Admixture-Enhancing Concrete Performance / M. Collepardi // 6th Intern. Congress "Global Construction, Ultimate Concrete Opportunities", 5-7 July 2005: Proc. – Dundee (U.K.), 2005 – 15 pp.

80. Rajabipour F. Interactions between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste's pore solution [Text] / F. Rajabipour, G. Sant, J. Weiss // *Cement and Concrete Research*. – 2008. – Vol. 38. – P. 606-615.

81. Deboodt, Tyler Durability Assessment of High-Performance Concrete with SRAs and FLWAs [Text] / Tyler Deboodt, Tengfei Fu, Jason H Ideker// *Cement and Concrete Composites*. – 2015. - Vol. 57. – P. 94-101.

82. Falikman, V. R. Influence of New Organic Shrinkage Reducing Agents on Concrete Performance [Text] / V. R. Falikman, A. Ya. Vainer // *Proceedings of the International RILEM Conference «Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete»*, August 15–18, 2010, Lyngby, Denmark // RILEM Publications S. A. R. L., PRO 74. – Lyngby, 2010. - P. 93–103.

83. Lopes, Anne N.M. Shrinkage-Reducing Admixture : Effects on Durability of High-Strength Concrete / A.N.M. Lopes, E.F. Silva, D.C.C. Dal Molin, R.D.T. Filho // *ACI Materials Journal*. – 2013. – Vol. 110, Jul/Aug. Iss. 4. – P. 365–374.

84. Saje, D. Reduction of the Early Autogenous Shrinkage of High Strength Concrete / D. Saje // *Advances in Materials Science and Engineering*. – №10. – 2015. – P. 1-8.

85. Zhuang J. Evaluation of concrete mix design to mitigate early-age shrinkage cracking in bridge decks / Jianmin Zhuang // A dissertation/thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering: Washington State University, Department of Civil and Environmental Engineering, August 2009. – 140 pp.

86. Zaichenko M. Effect of expansive agent and shrinkage reducing admixture in shrinkage-compensating concrete under hot-dry curing environment / M. Zaichenko, A. Nazarova, Qusay Al-Marshdi // *ТЕКА*. – Vol. 14. – №2. – Lublin, 2014. – P. 170-178.

87. Каприелов, С.С. Влияние органоминерального модификатора МБ-50С на структуру и деформативность цементного камня и высокопрочного бетона / Каприелов С.С, Карпенко Н.И. // *Бетон и железобетон*. – 2001. – №4. – С.2-7.

88. Каприелов, С.С. Влияние состава органоминеральных модификаторов бетона серии «МБ» на их эффективность / Каприелов С.С, Шейнфельд А.В. // Бетон и железобетон. – 2001. – №5. – С.11-15.

89. Каприелов, С.С. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона / Каприелов С.С, Шейнфельд А.В., Кривобородов Ю.Р. / Бетон и железобетон. – 1992. – №7. – С.4-7.

90. Каприелов, С.С. Деформативные свойства бетонов с использованием ультрадисперсных отходов Ермаковского завода ферросплавов / Каприелов С.С, Булгакова М.Г., Вихман Я.Л. // Бетон и железобетон. – 1991. – №3. – С 24-25.

91. Каприелов, С.С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива / Каприелов С.С, Шейнфельд А.В., Батраков А.В. // Бетон и железобетон. 1996. №6. С.6-10.

92. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – М.: Высшая школа, 1998. – 768 с.

93. Каприелов С.С, Шеренфельд А.В., Батраков Е.Г. Комплексный модификатор бетона марким МБ-01 / Каприелов С.С, Шейнфельд А.В., Батраков Е.Г. // Бетон и железобетон. – 1997. – №5. – С.38-41.

94. Иссерс Ф.А. Прочностные и деформационные свойства высокопрочного бетона с модификатором МБ 10-01 / Ф.А. Иссерс, М.Г. Булгакова, Н.И. Вершинина // Бетон и железобетон. – 1999. – №3. – С.6-9.

95. Ольгинский, А.Г. Пылеватые минеральные добавки к цементным бетонам / А.Г. Ольгинский // Строительные материалы и конструкции. – 1990. – №3. – С. 18.

96. Hooton, R.D. Advantages of Silica fume-Slag Ternary Binders for Production of Durable Concrete / R.D. Hooton // Proceedings of XXII Nordic concrete research symposia. – Reykjavik, 2014. – pp. 9-12.

97. Dallaire E. High-performance powder / Dallaire E., Aitcin P.C., Lachemi M. // Civil Engineering. – 1998. – V.68. – №1. – P. 48-51.

98. Сороканич, С.В. Тяжелые бетоны повышенной коррозионной стойкости с модификаторами на основе стеклянного порошка: дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / С.В. Сороканич – Макеевка, 2019 – 160 с.

99. Кирсанова, А.А. Высокофункциональные тяжелые бетоны, модифицированные комплексными добавками, включающими метаколин : дис. канд. техн. наук : 05.23.05 / А. А. Кирсанова – Томск, 2016. – 164 с.
100. Кардумян, Г.С. Новый органо-минеральный модификатор серии «МБ» – Эмбелит для производства высококачественных бетонов / Г.С. Кардумян, С.С. Каприелов // Строительные материалы. – № 8, 2005. – С. 12-15.
101. Сиверцев, Г.Н. Расширяемость цементов / Г.Н. Сиверцев, А.И. Лапшина, Л.В. Никитина // Совершенствование методов исследования цементного камня и бетона. – М., 1968. – 70 с.
102. Ратинов, В.Б. Химия в строительстве / В.Б. Ратинов, Ф.М. Иванов. – М.: Стройиздат, 1977 г. – 220 с.
103. Сиверцев, Г.Н. О природе напрягающего цемента / Г.Н. Сиверцев, А.И. Лапшина, Л.В. Никитина // Совершенствование методов исследования цементного камня и бетона. – М.: Стройиздат, 1968. – 214 с.
104. Кравченко, И.В. Расширяющиеся цементы / И.В. Кравченко. – М.: Госстройиздат, 1962 г. – 164 с.
105. Михайлов, В.В. Расширяющийся и напрягающий цементы и самонапряженные железобетонные конструкции / В.В. Михайлов, С.Л. Литвер. – М.: Стройиздат, 1974. – 312с.
106. Баженов, Ю.М. Разработка органо-минеральных модификаторов для получения высокопрочных бетонов с компенсированной усадкой / Ю.М. Баженов, Нгуен Тхе Винь, Нгуен Динь Чинь // Вестник МГСУ. – 2012 г. – № 1 – С. 72-76.
107. Каприелов, С.С. Высокопрочные бетоны с органо-минеральными модификаторами серии «МБ». Структура и свойства / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд // Бетон на рубеже третьего тысячелетия: Мат-лы 1-й Всерос. конф. по проблемам бетона и железобетона. – М.: Ассоциация «Железобетон», 2001. – Кн. 2. – С. 1019-1026.
108. Филатов, Л.Г. Расширяющие геоцементные композиции на основе вторичного сырья / Л.Г. Филатов, А.М. Царенко // I-я Всероссийская конференция по проблемам бетона и железобетона. – 2000 г. – т. 3. – с. 1236-1247.

109. ГОСТ Р 56178-2014. Модификаторы органо-минеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия. – М. : Стандартиформ, 2015. – 27 с.

110. Батудаева, А.В. Высокопрочные модифицированные бетоны из самовыравнивающихся смесей / А.В. Батудаева, Г.С. Кардумян, С.С. Каприелов // Бетон и железобетон. – 2005. – № 4. – С. 14-18.

111. Крамар, Л.Я. Оптимизация структуры и свойств цементного камня и бетона введением тонкодисперсной добавки аморфного кремнезема: Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. / Л.Я. Крамар. – М., 1989. – 17 с.

112. Михайлюта Е.С. Особенности формирования фазового состава метаксаолинов и его влияние на их свойства / Е.С. Михайлюта, Е.В. Алексеев, В.В. Коледа, Т.А. Шевченко // Цемент и его применение – № 5 – 2012. – С. 66-72.

113. Трофимов, Б.Я. Механизм «старения» гидратных фаз цементного камня при циклическом замораживании / Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар // Популярное бетоноведение. – № 3 (29), 2009. – С. 69-83.

114. Kleingelhöfer P. Neue Betonverflüssiger auf Basis Polycarboxilat. / P. Kleingelhöfer // Proc. 13. Ibasil Weimar 1997, Bd. 1, – s. 491-495.

115. Ушеров-Маршак, А.В. Добавки нового поколения / А.В. Ушеров-Маршак // Химические и минеральные добавки в бетон. – Харьков: Колорит, 2005. – С. 45-50.

116. DeRousseau, M.A. Computational design optimization of concrete mixtures: A review / M.A. DeRousseau, J.R. Kasprzyk, W.V. Srubar III // Cement and Concrete Research. – 2018. – vol.109. – pp.42–53.

117. Коренькова, С.Ф. Добавки к бетонам / С.Ф. Коренькова // Цементы, бетоны, строительные растворы и сухие смеси. Часть I: Справочник. – Санкт-Петербург: НПО «Профессионал», 2007. – С. 236-265.

118. Крамар Л.Я. Модификаторы цементных бетонов и растворов (Технические характеристики и механизм действия) / Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, Е.А. Гамалий, Т.Н. Черных, В.В. Зимич. – Челябинск: ООО «Искра-Профи», 2012. – 202 с.

119. Мехта П.К. Минеральные добавки. / Добавки в бетон. Под ред. В.С. Рамачандрана; Пер. с англ. Т.И. Розенберг и С.А. Болдырева. – М.: Стройиздат, 1988. – С.260-297.
120. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. – 187 с.
121. Добавки в бетон: [справ. пособие] / [Рамачандран В.С., Фельдман Р.Ф., Коллепарди М. и др.]. – М.: Стройиздат, 1988. – 575 с.
122. Baronio, G. Mechanical properties and durability of super plasticized silica fume mortars / G. Baronio, G. Mantegazza, G. Carminati // *Admixtures for Concrete. Improvement of Properties: Proceedings of the International Symposium held by RILEM.* – London: Chapman and Hall, 1990. – P. 241-254.
123. Крамар, Л.Я. Влияние водовяжущего фактора на структуру и прочность цементного камня с добавкой микрокремнезема / Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, С.П. Горбунов // *Межвуз. сб. тр. «Совершенствование технологии вяжущих, бетонов и железобетонных конструкций».* – Пермь, 1989. – С. 25-33.
124. Zengqi, Z. Hydration and microstructures of concrete containing raw or densified silica fume at different curing temperatures / Z. Zengqi, B. Zhang, P. Yan // *Construction and Building Materials.* – 2016. – vol. 121. – pp. 483–490.
125. Zaichenko, N.M. High-strength fine-grained concretes with modified mineral admixtures of fly ash and milled slag of power station / N.M. Zaichenko, A.K. Khalyushev, E.V. Sakhoshko // *Alkali Activated Materials – Research, Production, Utilization: International Conf., June 2007: Proc.* – Prague (Czech R.), 2007. – P. 745-756.
126. Халюшев, А.К. Оптимизация состава композиционных цементов с минеральными дообавками на основе отходов промышленности / А.К. Халюшев, Н.М. Зайченко, С.С. Поливцев // *Зб. наук. праць "Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди".* – Рівне: Вид-во НУВГП, 2008. – Вип. 16 (Ч. 1). – С. 103-110.
127. Брыков, А.С. Метакаолин / Брыков А.С. // *Цемент и его применение* – № 4, 2012. – С. 36-40.

128. Дворкин, Л.И. Метакаолин в строительных растворах и бетонах / Л.И. Дворкин, Н.В. Лушникова, Р.Ф. Рунова и др. – Киев: Издательство КНУБіА, 2007. – 215с.
129. Захаров, С.А. Высокоактивный метакаолин - современный минеральный модификатор цементных систем / С.А. Захаров, Б.С. Калачик // Строительные материалы. – 2007. – № 5. – С. 56-57.
130. Малолепши, Я. Влияние метакаолина на свойства цементных растворов / Я. Малолепши, З. Питель // Химические и минеральные добавки в бетон. – Харьков: Колорит, 2005. – С. 61-77.
131. Calderone, M.A. High Reactivity Metakaolin A Mineral Admixture for High Performance Concrete. / Calderone M.A., Gruber K.A. / Concrete Under Severe Conditions. – 1995. – P. 1015-1024.
132. Пустовгар, А.П. Применение метакаолина в сухих строительных смесях / А.П. Пустовгар, А.Ф. Бурьянов, Е.В. Васильев // Строительные материалы. – 2010. – № 10. – С. 78-81.
133. Хораб Х.Ю. Применение метакаолина в качестве заменителя цемента / Х.Ю. Хораб, Х.Е.Х. Ахмед, А. Тавфик // Цемент и его применение – 2011. – № 6. – С. 86-89.
134. Cementitious properties of Metakaolin-normal Portland Cement Mixture in the presence of petroleum effluent treatment plant sludge / N. J. Saikia et al. // Cement and Concrete Research – №32 – 2002 – pp. 1717-1724.
135. Ефремов А.Н. Пуццолановая активность метакаолина и шамотно-каолиновой пыли-унос / А.Н. Ефремов, Н.М. Зайченко // Строительство-2006: междунар. науч.-практ. конф., 2006 г.: мат-лы конф. – Ростов-на-Дону, 2006. – С. 99-101.
136. Нгуен Тхе Винь. Высокопрочные бетоны с органоминеральным модификатором, содержащим расширяющий компонент : дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Нгуен Тхе Винь. – Москва, 2012. – 124 с.
137. Та Ван Фан. Самоуплотняющиеся высокопрочные бетоны с золой рисовой шелухи и метакаолином : автореферат дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Та Ван Фан. – Ростов-на-Дону, 2013. – 23 с.

138. Влияние электроповерхностных явлений на процессы твердения цементного камня и бетона [Текст] / В.И. Бабушкин, Е.В. Кондращенко, Т.А. Костюк [и др.] // Материалы II Всероссийской конференции по бетону и железобетону. – М., 2005. – С. 19-23.

139. ГОСТ 24544-81. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести (с Изменением N 1). – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 26 с.

140. Горшков, В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ [Текст] / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – Москва: Высшая шк., 1981. – 335 с.

141. Миркин, Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов [Текст] / Л.И. Миркин. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. – 863 с.

142. Тейлор, Х. Химия цемента [пер. с англ.] / Х. Тейлор. – М.: Мир, 1996. – 560 с.

143. Бондарь, А.Г. Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии (алгоритмы и примеры): Учеб. пособие. / А.Г. Бондарь, Г.А. Статюха, И.А. Потяженко. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1980. – 264 с.

144. Вознесенский, В.А. Современные методы оптимизации композиционных материалов [Текст] / В.А. Вознесенский, В.Н. Выровой, В.Е. Керш, Т.В. Ляшенко – К.: Будивельник, 1983. – 144 с.

145. Зайченко Н.М. Высокопрочные тонкозернистые бетоны с комплексно модифицированной микроструктурой [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.23.05 / Н.М. Зайченко. – Макеевка, 2009. – 356 с.

146. Зайченко, Н.М. Влияние полифункционального модификатора (добавка, снижающая усадку – суперпластификатор – микрокремнезем) на свойства самоуплотняющейся бетонной смеси и твердение бетона [Текст] / Зайченко Н.М., Назарова А.В., Ал-Маршди Косай // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Вип. 26. – Рівне: Вид-во НУВГП, 2013. – С. 167-171.

147. Pei-min Zhan, Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review [Text] / Pei-min Zhan, Zhi-hai He // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 201. – P. 676-690.

ПРИЛОЖЕНИЕ А**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ТОРГОВАЯ КОМПАНИЯ «СБМ»**

91021, г. Луганск, ул. Тимирязева, 3ж

№ 28/03 от 30.08.21

Утверждаю:

Директор ООО «ТК «СБМ»
Котковец А.С.30 2021 г.

Диссертационный совет Д 01.006.02
при ГОУ ВПО «Донбасской
национальной академии строительства
и архитектуры»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Коваленко Дениса Сергеевича на тему «Тяжелые цементные бетоны с
пониженной усадкой из подвижных смесей», представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 –
Строительные материалы и изделия, при использовании бетонных смесей,
модифицированных комплексным модификатором на основе расширяющей
добавки при производстве цементобетонных площадок
на КПВВ «Золотое»

В период с 12.10.2020 г. по 26.10.2020 г. представителями ГОУ ВО ЛНР
«Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Институт
строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства
Сороканичем С.В., к.т.н., доцентом кафедры городского строительства и
хозяйства и Коваленко Д.С., соискателем кафедры городского строительства
и хозяйства, при участии представителя ООО «Торговая компания «СБМ»
Ноздрин В.Ф., заведующего производством, осуществлен выпуск и опытно-
промышленные испытания бетонных смесей и бетонов модифицированных
комплексным модификатором на основе расширяющего компонента
оксидносульфоалюминатного типа в виде смеси шамотно-каолиновой пыли,
гипса и извести, активной минеральной добавки – микрокремнезема и
поликарбосилатного суперпластификатора при производстве
цементобетонных площадок контрольного пункта въезда-выезда «Золотое»
(ЛНР, п. Золотое) в объеме 11 м³.

В результате проведенных опытно-промышленных испытаний принято
решение относительно внедрения предложенных составов бетонных смесей,
которые содержат комплексный модификатор на основе расширяющей
добавки ОА, микрокремнезема и поликарбосилатного суперпластификатора.

Показатели качества бетонных смесей и бетонов опытно-промышленной партии представлены в таблице 1.

Таблица 1

Свойства модифицированных бетонных смесей и бетона

№	Наименование показателя	Единицы измерения	Показатели для бетонных смесей, бетона
1	Подвижность бетонной смеси (осадки конуса)	см	17-20 (П4)
2	Среднее значение прочности бетона при сжатии (класс бетона)	МПа	43 (В30)
3	Деформации усадки	мм/м	-0,42

Расчет себестоимости бетонных смесей по основному показателю – стоимости сырьевых материалов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Калькуляция стоимости сырьевых материалов

Наименование сырьевых материалов	Ед. изм.	Стоимость материала, руб.	Расход на 1 м ³ бетона	Стоимость на 1 м ³ бетона
Состав с расширяющей добавкой «Ехранcrete»				
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	т	6400	0,400	2560
Песок	т	400	0,545	218
Щебень	т	650	1,175	763,75
Вода	т	33,64	0,176	5,92
Суперпластификатор Master Glenium 115	л	230	5,2	1196
Микрокремнезем	кг	15	38	570
Ехранcrete	кг	100	28	2800
Итого:				8113,67
Состав с расширяющей добавкой ОСА				
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	т	6400	0,400	2560
Песок	т	400	0,545	218
Щебень	т	650	1,175	763,75
Вода	т	33,64	0,176	5,92
Суперпластификатор MasterGlenium 115	л	230	5,2	1196
Микрокремнезем	кг	15	38	570
Добавка ОСА:				
- шамотно-каолиновая пыль	кг	15	20,8	312
- гипс	кг	4	9,6	38,4
- известь	кг	7	1,6	11,2
Итого:				5675,27

Общий экономический эффект при замене фирменного расширяющего компонента «Ехрaнcrete» на расширяющую добавку ОСА из местного сырья при производстве бетонной смеси объемом 11 м³ составит:

$$\text{Э} = (8113,67 - 5675,27) \cdot 11 = 26822,40 \text{ руб.}$$

Представители ГОУ ВО ЛНР «ЛГУ
им. В.Даля»:

к.т.н., С.В. Сороканич

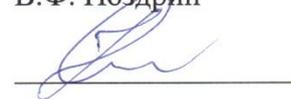


соискатель Д.С. Коваленко



Представители ООО «ТК «СБМ»:

заведующий производством
В.Ф. Ноздрин



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО
ХОЗЯЙСТВА ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ТОРГОВАЯ КОМПАНИЯ «СБМ»

СОГЛАСОВАНО:
Заведующий производством
предприятия ООО «ТК «СБМ»

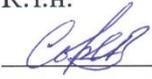

В.Ф. Ноздрин
«27» 04 2021 г.

УТВЕРЖДАЮ:
Директор
предприятия ООО «ТК «СБМ»

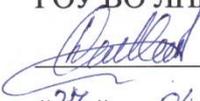

А.С. Котковец
«04» 04 2021 г.

ИНСТРУКЦИЯ ПО ПРИГОТОВЛЕНИЮ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ТЯЖЕЛЫХ БЕТОНОВ С ПОНИЖЕННОЙ УСАДКОЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО МОДИФИКАТОРА

РАЗРАБОТАНО:
Заведующий кафедрой «Городское
строительство и хозяйство»
ИСАиЖКХ
ГОУ ВО ЛНР «ЛГУ им. В.Даля»
К.т.н.


С.В. Сороканич
«27» 04 2021 г.

Соискатель кафедры
«Городское строительство и
хозяйство»
ИСАиЖКХ
ГОУ ВО ЛНР «ЛГУ им. В.Даля»


Д.С. Коваленко
«27» 04 2021 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»**
91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а
телефон (0642) 34-48-28, факс (0642) 34-48-48, e-mail: dahl.univer@yandex.ru

06.07.2021 № 108-115-1714/131

На № _____

Диссертационный совет Д 01.006.02
при ГОУ ВПО «Донбасской национальной
академии строительства и архитектуры»

СПРАВКА

о внедрении в учебный процесс в Луганском государственном университете имени Владимира Даля результатов исследования диссертационной работы Коваленко Дениса Сергеевича на тему «Тяжелые цементные бетоны с пониженной усадкой из подвижных смесей», предоставленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Комиссия в составе: ректора ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля» д.т.н., профессора Рябичева В.Д., проректора ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля» по научно-учебной работе д.т.н., профессора Мирошников В.В., зав. кафедрой «Городское строительство и хозяйство» Института строительства, архитектуры и ЖКХ ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля» к.т.н. Сороканича С.В. свидетельствует, что при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство» в дисциплине «Строительные материалы», а также при подготовке магистров по направлению 08.04.01 «Строительство» в дисциплине «Перспективы развития строительного материаловедения, ресурсо- и энергосбережение в городском строительстве» используются теоретические и экспериментальные данные по кандидатской диссертационной работе Коваленко Дениса Сергеевича «Тяжелые цементные бетоны с пониженной усадкой из подвижных смесей».

Члены комиссии:

Ректор ГОУ ВО ЛНР «Луганский
государственный университет имени Владимира Даля»,
д.т.н., профессор

В.Д. Рябичев

Проректор ГОУ ВО ЛНР «Луганский
государственный университет имени Владимира Даля»
по научно-учебной работе
д.т.н., профессор

В.В. Мирошников

Зав. кафедрой «Городское строительство и хозяйство»
Института строительства, архитектуры и ЖКХ
ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет
имени Владимира Даля»
к.т.н.

С.В. Сороканич