

На правах рукописи



**Филимонова Юлия Сергеевна**

**ТЯЖЕЛЫЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ ПОЛИДИСПЕРСНОГО  
ВЯЖУЩЕГО С КОМПЛЕКСНЫМ МОДИФИКАТОРОМ ДЛЯ  
ГИДРОМЕЛИОРАТИВНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Научный руководитель:

**Ткач Евгения Владимировна**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

**Перфилов Владимир Александрович**  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», кафедра «Нефтегазовые сооружения», заведующий кафедрой

**Мухаметрахимов Рустем Ханифович**  
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра «Технологии строительного производства», доцент

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Защита состоится «18» марта 2024 г. в 11:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ауд. 9 Студия «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» [www.mgsu.ru](http://www.mgsu.ru).

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.339.01



Иноземцев  
Александр Сергеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** К тяжелым бетонам, применяемым в гидромелиоративном строительстве, предъявляются высокие требования по долговечности, оцениваемой в первую очередь их прочностью, морозостойкостью и устойчивостью к вымыванию из цементного камня гидроксида кальция. Тонкостенные гидромелиоративные конструкции (толщиной до 15 см), в частности лотки, испытывают постоянное воздействие целого комплекса агрессивных факторов: воздействие воды высокой степени минерализации, в том числе грунтовых вод, кавитационное воздействие непрерывно перемещаемых водных потоков. Вышеперечисленные постоянно действующие агрессивные воздействия снижают надежность и постепенно разрушают мелиоративные конструкции. Поэтому прогрессивно увеличивается количество дефектов, что приводит к значительным потерям водных ресурсов, передаваемых по транспортной системе. В настоящее время имеются разработки по усилению и защите таких изделий материалами с повышенной степенью сопротивляемости агрессивным факторам, например, полимерными композициями. Однако, полимербетоны не нашли широкого распространения из-за их дефицитности и высокой стоимости, поэтому на сегодняшний день основным строительным материалом при возведении оросительных систем остаются бетон и железобетон.

Таким образом, получение тяжелых бетонов, в частности для гидромелиоративного строительства, с повышенными эксплуатационными свойствами путем модифицирования его структуры является *актуальной задачей*.

Для решения поставленной задачи основным направлением является создание структуры бетона высокой плотности, рационально сочетающего необходимые технологические и эксплуатационные характеристики, путем использования высокопрочных вяжущих веществ, обеспечивающих высокую плотность упаковки исходных частиц в каждом микрообъеме материала совместно с комплексным модификатором.

Работа выполнена в рамках государственной программы эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации в период с 2021 по 2030 годы.

**Степень разработанности темы исследования.** Проведен анализ научно-технической и патентной литературы отечественных и зарубежных ученых, а также обзор нормативно-технической документации по улучшению эксплуатационных свойств бетонов, в частности гидротехнических, с учетом разработки методов повышения их стойкости в условиях повышенной эксплуатационной нагрузки. Однако, вопросы модифицирования тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с управляемым зерновым составом совместно с комплексным модификатором (суперпластификатор+полимер+микрокремнезем) и их влияния на формирование структуры и свойства цементного камня, а также затвердевшего бетона в целом не изучались.

**Научная гипотеза:** повышение эксплуатационных характеристик тяжелого бетона (прочность, трещиностойкость, морозостойкость, водонепроницаемость, стойкость к воздействию агрессивных сред) для гидромелиоративного строительства может быть достигнуто путем управления зерновым составом цементного вяжущего, модифицированного комплексным модификатором (суперпластификатор+полимер+микрокремнезем) и армированного базальтовым волокном за счет формирования пространственно-армированной мелкокристаллической структуры цементной матрицы с максимально плотной упаковкой, которая сохраняется во времени при эксплуатации тяжелого бетона. Наличие в комплексном модификаторе микрокремнезёмистого компонента способствует протеканию пуццолановой реакции с образованием химически стойких низкоосновных гидросиликатов кальция, что положительно повлияет на коррозионную стойкость бетона.

#### **Цель и задачи исследования.**

Целью диссертационной работы является разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с управляемым зерновым составом совместно с комплексным модификатором (суперпластификатор+полимер+микрокремнезем) и

армированным базальтовым волокном с улучшенными эксплуатационными свойствами для гидромелиоративного строительства. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– определение оптимального состава полидисперсного вяжущего с высокой плотностью упаковки исходных частиц в каждом микрообъеме материала;

– обоснование возможности получения тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором для улучшения эксплуатационных свойств;

– исследование влияния модифицирования полидисперсного вяжущего комплексной добавкой на формирование структуры и свойств цементного камня и бетона на его основе;

– разработка рекомендаций по производству модифицированного тяжелого бетона для изделий оросительных систем и оценка технической эффективности с апробацией технологического решения.

**Объект исследования:** тяжелый бетон на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором (суперпластификатор+полимер+микрокремнезем), армированный базальтовым волокном для гидромелиоративного строительства, в частности лотков оросительных систем.

**Предмет исследования:** структура и свойства тяжелого бетона на основе полидисперсного цементного вяжущего с высокой плотностью упаковки совместно с комплексным модификатором (суперпластификатор+полимер+микрокремнезем) и армированного базальтовым волокном.

#### **Научная новизна.**

Обосновано и экспериментально доказано технологическое решение получения тяжелого модифицированного бетона на основе цементного вяжущего оптимального зернового состава (15% – средний диаметр частиц  $d_{cp}$  – 12 мкм с удельной поверхностью  $S_{уд} = 150 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; 75% –  $d_{cp} = 6,6 \text{ мкм}$ ,  $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; 10% –  $d_{cp} = 4,9 \text{ мкм}$ ,  $S_{уд} = 450 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) с высокой плотностью упаковки совместно с комплексным модификатором (0,3% Melflux+0,2% Полидон-А+15% МК) и базальтовым волокном (0,7% БВ). В результате образуется плотный упрочненный цементный камень упорядоченной мелкокристаллической структуры с

кристаллами от 60 до 75 нм и равномерно распределенными по всему объему микропорами от 0,1 до 0,6 мкм. Полученные результаты свидетельствуют о том, что наличие тонкодисперсного порошка ( $S_{уд} = 450 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) позволяет обеспечить высокие темпы роста прочности в ранние сроки твердения, а грубодисперсный порошок ( $S_{уд} = 150 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) увеличивает запас клинкерного фонда в цементном камне: количество низкоосновных гидросиликатов кальция увеличивается на 19% по сравнению с контрольным составом, а степень гидратации достигает 82% (в возрасте 6 мес.). Полученный модифицированный тяжелый бетон обладает повышенными прочностными, гидрофизическими свойствами и высокой стойкостью к коррозии, что положительно влияет на его долговечность.

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

Получены новые данные, дополняющие теоретические представления о процессе структурообразования тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с управляемым зерновым составом совместно с комплексным модификатором (суперпластификатор+полимер+микрокремнезем) и армированным базальтовым волокном. Повышение эксплуатационных характеристик модифицированного бетона, обусловлено формированием пространственно-армированной мелкокристаллической структуры цементной матрицы с максимально плотной упаковкой.

Разработан состав и технологические решения получения эффективного тяжелого бетона для гидромелиоративного строительства с повышенными эксплуатационными характеристиками: предел прочности на сжатие – 77,3 МПа; предел прочности на растяжение при изгибе – 8,62 МПа; условный коэффициент интенсивности напряжений –  $0,074169 \text{ МПа} \times \text{м}^{0,5}$ , водопоглощение – 1,9%; марка по водонепроницаемости – W14; морозостойкость  $F_1=600$ , повышенная стойкость к агрессивным средам.

Разработаны технические условия ТУ 236112-016-80769602-2023 «Эффективный модифицированный тяжелый бетон для производства лотков», утвержденные ООО «ИнжСпецСтрой».

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

Методологической основой диссертационной работы являются научные

разработки в области получения тяжелых бетонов с заданными эксплуатационными характеристиками, а также применение системно-структурного подхода строительного материаловедения «состав – структура – свойства». Исследования проводились с использованием современных методов: лазерной гранулометрии, рентгенофазового, электронно-микроскопического и химического анализов; в целях формирования плотных упаковок тонкодисперсных фракций клинкерного компонента применялся анализ гранулометрии; метод математической обработки полученных экспериментальных данных.

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

– обоснование возможности получения тяжелого бетона с повышенными эксплуатационными характеристиками, за счет управления составом цементного вяжущего различной дисперсности с высокой плотностью упаковки модифицированного комплексным модификатором и базальтовым волокном;

– результаты исследования комплексного модифицирования и оценка его влияния на формирование структуры и свойств цементного камня и бетона на его основе;

– экспериментальные зависимости эксплуатационных свойств (предел прочности на сжатие и изгиб, трещиностойкость, гидрофизические, коррозионная стойкость) модифицированного бетона на основе полидисперсного вяжущего от содержания комплексного модификатора и базальтового волокна;

– оценка технико-экономической эффективности и рекомендации по производству изделий для гидромелиоративного строительства (лотки) из модифицированного бетона.

#### **Степень достоверности результатов исследования.**

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием нормативных документов, широкого спектра методов исследований с применением сертифицированного и поверенного научно-исследовательского оборудования, сходимостью теоретических и экспериментальных исследований и воспроизводимостью результатов с вероятностью 0,95 при большом объеме экспериментов; положительными результатами опытно-промышленного внедрения и практической апробации разработанного эффективного бетона на

основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором, армированного базальтовым волокном для гидромелиоративного строительства.

#### **Апробация результатов исследования.**

Основные положения работы доложены и обсуждены на конференциях: «Строительство – формирование среды жизнедеятельности. XXI Международная научная конференция» (г. Москва, 2018); VI научная конференция «Интеграция, партнёрство и инновации в строительной науке и образовании» (г. Москва, НИУ МГСУ, 2018); «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (г. Ташкент, 2019); VII Международная научная конференция «Интеграция, партнёрство и инновации в строительной науке и образовании», (г. Ташкент, 2020); Национальная конференция (г. Москва, 2020 г.), FORM-2023 (г. Ташкент, 2023).

**Внедрение результатов исследования.** Апробация разработанного технологического решения проведена на заводе «Технология-Тула». Выпущена опытная партия железобетонных водоотводных лотков серии GRENT MegaT500 в количестве 220 шт. и лотков оросительных систем ЛР-6 в количестве 200 шт.

**Личный вклад** соискателя состоит в разработке целей и задач, программы и выборе методов исследований, анализе гранулометрии в целях формирования плотных упаковок тонкодисперсных фракций клинкерного компонента с помощью программно-расчетного комплекса, основанного на использовании алгоритма «Drop and Roll»; оптимизации состава модифицированной тяжелой смеси; в разработке рекомендаций по использованию модифицированного тяжелого бетона для гидромелиоративного строительства, в опытной апробации разработанного бетона и технико-экономическом обосновании эффективности его применения.

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы изложены в 13 научных публикациях, в том числе 7 работ – в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК РФ, 4 работы опубликовано в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science; 1 работа – в журнале, входящем в базы данных РИНЦ.



Получено свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620513, 01.04.2019 г.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа изложена на 170 страницах машинописного текста, состоит из оглавления, введения, основной части, состоящей из пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 181 наименования и 3 приложений, содержит 45 таблиц, 29 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** проанализированы труды российских и зарубежных авторов в области применения химико-минеральных модификаторов для повышения качества структуры и свойств тяжелого бетона. Рассмотрены специальные требования, предъявляемые к гидромелиоративным конструкциям. Выявлено, что тонкостенные конструкции испытывают постоянное воздействие комплекса агрессивных факторов: воды высокой степени минерализации, в том числе грунтовых вод, кавитационное воздействие непрерывно перемещаемых водных потоков при ежесуточных и ежесезонных температурно-влажностных колебаниях. Вышеперечисленные агрессивные воздействия снижают надежность оросительных систем. Рассмотрены научные предпосылки комплексного модифицирования структуры бетона на микроуровнях путем применения полидисперсных компонентов и комплексного модификатора с целью повышения концентрации твердой фазы в каждой единице объема бетона, а также его прочности, непроницаемости и долговечности.

**Во второй главе** представлены характеристики исходных материалов и методы исследования. Минеральное вяжущее – портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, ООО «Холсим (Рус) СМ» (ГОСТ 31108-2020); природный песок с модулем крупности 2,5 (Хромцовский карьер; ГОСТ 8736-2014); гранитный щебень, фр. от 5 до 15 мм, ООО «Богаевкий карьер» (ГОСТ 8267-93); суперпластифицирующая добавка – «Melflux 5581F» (ГОСТ 24211-2008), полимерная добавка – «ПОЛИДОН-А» (ООО «Оргполимерсинтез»; ТУ 9365-002-46270704-2001); микрокремнезем марки МКУ-95 (ООО НТЦ "ЭВЕРЕСТ"; ГОСТ Р 58894-2020); рубленое базальтовое волокно (БВ) (ООО «ИнРес»; ТУ 5952-002-13307094-08).

Исследования проводились с применением современных методов анализа: лазерной гранулометрии, рентгенофазового, электронно-микроскопического и химического анализов, методов математической обработки полученных экспериментальных данных. Анализ гранулометрии тонкодисперсных фракций клинкерного компонента выполнен с помощью программно-расчетного комплекса, основанного на использовании алгоритма «Drop And Roll».

**В третьей главе** в соответствии с методическим пособием «Рекомендации по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов»,

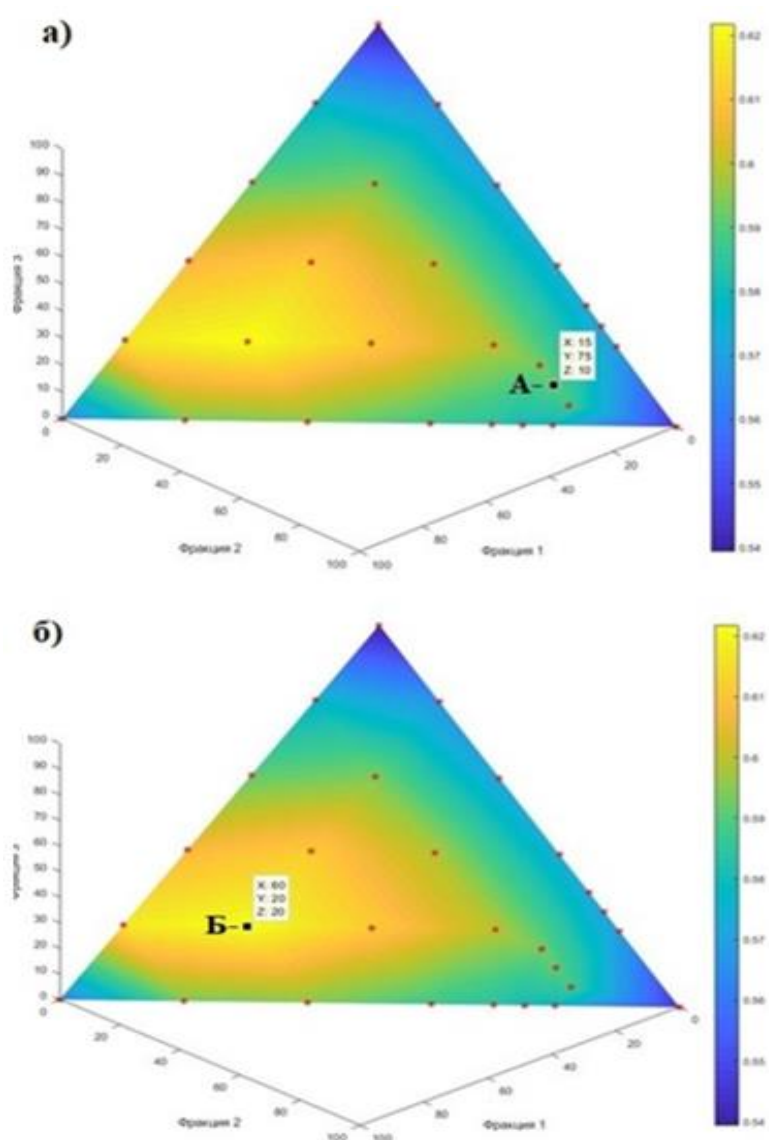


Рисунок 1 – Влияние зернового состава вяжущего на плотность упаковки: а) положение проектируемого состава с плотностью упаковки 0,59083; б) максимальное значение с плотностью упаковки 0,592656

разработанным НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» рассчитан контрольный состав тяжелой бетонной смеси, который позволяет обеспечить получение тяжелого бетона с заданным комплексом эксплуатационных показателей.

В целях получения оптимального состава полидисперсного вяжущего исследовались топологические характеристики получаемых цементных композиций с применением программно-расчетного комплекса, основанного на использовании алгоритма «Drop and Roll».

Анализ научных литературных источников

показал, что для уменьшения влияния «пристенного эффекта», отношение диаметра частицы к размеру упаковки должно быть  $> 20$ . В связи с тем, что расчёт

упаковки в 20 диаметров наибольшей сферы займет очень продолжительное время, было принято решение изучать единичную ячейку, с отношением большего диаметра сферы к стороне 1 к 14. В нашем случае наибольший диаметр равен 12 мкм, что согласуется с данными гранулометрического состава используемых порошков, следовательно размер ячейки будет 168x168x168 мкм. Исходные данные для расчета топологических характеристик и графическое изображение влияния зернового состава вяжущего на плотность упаковки представлены в табл.1 и рис.1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета топологических характеристик

| №  | Дисперсные составы цементных частиц            |     |           |     |     |     | Прочность цементного камня на сжатие |      |
|----|--|-----|-----------|-----|-----|-----|--------------------------------------|------|
|    |  |     |           |     |     |     | МПа, в возрасте, сут.                |      |
|    | Удел. поверхность составов, м <sup>2</sup> /кг |     | Состав, % |     |     |     | 7                                    | 28   |
| 1  | ЦЕМ 42,5 Н контр.                              |     |           |     |     |     | 28,4                                 | 43,5 |
| 2  | 150  | 0   | 0         | 100 | 0   | 0   | 20,3                                 | 25,2 |
| 3  | 0  | 300 | 0         | 0   | 100 | 0   | 26,2                                 | 39,4 |
| 4  | 0  | 0   | 450       | 0   | 0   | 100 | 38,6                                 | 49,7 |
| 5  | 150  | 300 | 0         | 20  | 80  | 0   | 24,1                                 | 39,6 |
| 6  | 150  | 300 | 0         | 25  | 75  | 0   | 20,7                                 | 31,3 |
| 7  | 150  | 300 | 0         | 30  | 70  | 0   | 19,0                                 | 28,6 |
| 8  | 0  | 300 | 450       | 0   | 80  | 20  | 41,2                                 | 58,5 |
| 9  | 0  | 300 | 450       | 0   | 75  | 25  | 47,4                                 | 60,7 |
| 10 | 0  | 300 | 450       | 0   | 70  | 30  | 50,6                                 | 63,2 |
| 11 | 150  | 300 | 450       | 15  | 80  | 5   | 40,2                                 | 52,0 |
| 12 | 150  | 300 | 450       | 15  | 75  | 10  | 44,6                                 | 56,4 |
| 13 | 150  | 300 | 450       | 15  | 70  | 15  | 48,5                                 | 57,8 |

Анализ данных (рис.1), показал снижение плотности упаковки в предлагаемом составе на 0,5% (рис.1 а, точка А) в сравнении с максимальным расчетным значением (рис.1 б, точка Б). Учитывая факт повышения энергозатрат при получении тонкодисперсного порошка с удельной поверхностью 450 м<sup>2</sup>/кг, было принято решение взять за оптимальную упаковку состав 12 (табл.1, рис.1 а, точка А) с соотношением цементных частиц в %: 15 – со средним диаметром  $d_{cp}=12$  мкм и удельной поверхностью  $S_{уд}=150$  м<sup>2</sup>/кг; 75 –  $d_{cp}=6,6$  мкм,  $S_{уд}=300$  м<sup>2</sup>/кг; 10 –  $d_{cp}=4,9$  мкм,  $S_{уд}=450$  м<sup>2</sup>/кг.

С помощью метода планирования эксперимента установлены зависимости влияния управляющих факторов на выделенные параметры качества бетона. Получены регрессионные уравнения второго порядка, которые адекватно описывают зависимость прочности на сжатие, условного коэффициента интенсивности напряжений в возрасте 28 суток нормального твердения и водопоглощения модифицированного тяжелого бетона в возрасте 28 суток нормального твердения от переменных  $X_1$  – расход полимерной добавки Полидон-А и  $X_2$  – расход базальтового волокна, % от массы вяжущего.

В качестве управляющих факторов целевых функций экспериментальной модели были выбраны:  $Y_1$  – прочность на сжатие ( $R_{сж}$ , МПа),  $Y_2$  – условный коэффициент интенсивности напряжений ( $K_c^*$ , МПа $\times$ м<sup>0,5</sup>),  $Y_3$  – водопоглощение ( $W_m$ , %). Входные факторы, влияющие на исследуемые характеристики, приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Интервалы и уровни варьирования входных факторов для планирования эксперимента второго порядка

| Варьируемые факторы |   | Основные уровни | Интервалы варьирования |
|---------------------|---|-----------------|------------------------|
| $X_1$               | Содержание полимерной добавки Полидон-А | 0,2             | 0,1                    |
| $X_2$               | Содержание волокна                      | 0,7             | 0,15                   |

Уравнения регрессии для модифицированного тяжелого бетона имеют следующий вид:

$$Y_1 = 77,3 + 1,62X_1 + 1,13X_2 + 2,15X_1X_2 - 7,37X_1^2 - 6,44X_2^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,074 + 0,002X_1 + 0,001X_2 + 0,003X_1X_2 - 0,005X_1^2 - 0,004X_2^2 \quad (2)$$

$$Y_3 = 1,9 - 0,2X_1 - 0,11X_2 - 0,25X_1X_2 + 0,65X_1^2 + 0,45X_2^2 \quad (3)$$

Адекватность уравнений регрессии проверялась автоматически по критериям Стьюдента и Фишера. Ошибка при аппроксимации находилась в пределах 1...2 %.

Используя инструменты компьютерной программы Matlab R2015b найдено максимальное значение целевой функции регрессионного уравнения второго порядка:

$MAX Y_1^{max} = 77,3538$  при  $X_1 = 0,0244$ ,  $X_2 = 0,0918$ , что в натуральных значениях составляет 0,202% и 0,714%, соответственно.  $MAX Y_2^{max} = 0,0744$  при

$X_1 = 0,2676$ ,  $X_2 = 0,2254$ , что в натуральных значениях составляет 0,227% и 0,734%, соответственно.  $\text{MIN } Y_3^{\text{min}} = 2,352$  при  $X_1 = 0,380$ ,  $X_2 = 0,120$ , что в натуральных значениях составляет 0,238% и 0,718%, соответственно. Установлены оптимальные значения  $X_1^{\text{опт}} = 0,2$ ;  $X_2^{\text{опт}} = 0,7$  в натуральном виде, при которых функция  $Y_1$  – прочность на сжатие ( $R_{\text{сж}}$ ) принимает максимальное значение, а  $Y_3$  (водопоглощение,  $W_m$ ) – минимальное. После подстановки найденных значений в уравнения 2-4 были определены прочность на сжатие  $R_{\text{сж}} = 77,3$  МПа,  $K_c^* = 0,074169$  МПа $\times$ м<sup>0.5</sup>; водопоглощение  $W_m = 1,9$  %.

В четвертой главе приведены результаты исследования рентгенофазового анализа цементного камня различных составов на основе полидисперсного вяжущего, полученного путем помола заводского портландцементного клинкера (табл. 3).

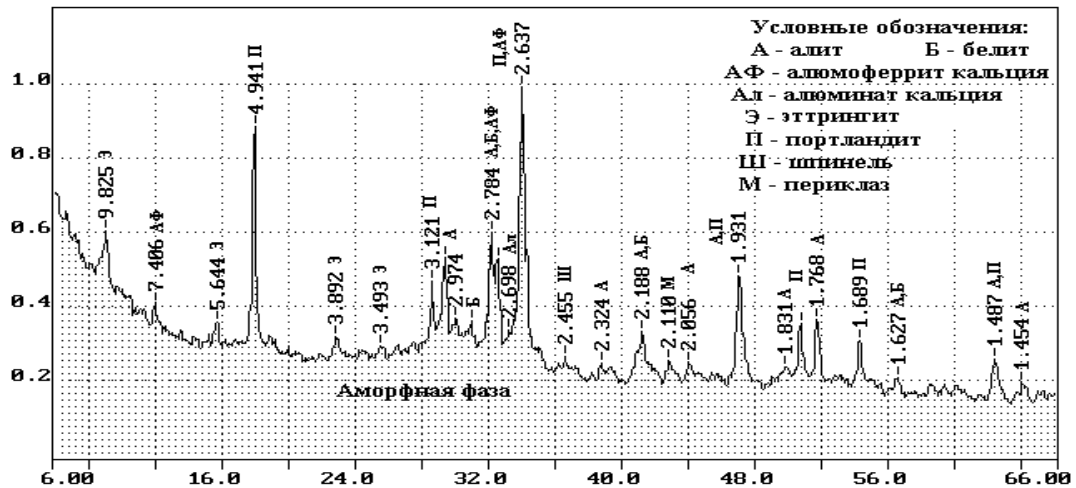
Таблица 3 – Составы цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения, изготовленных из цементного теста нормальной густоты

| Материалы   | Расход материалов для получения цементного теста нормальной густоты, г |      |      |      |      |      |
|---|--|------|------|------|------|------|
|   | 1  | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| ЦЕМ I 42,5 Н (завод.)   | 400  | -    | -    | -    | -    | -    |
| Полидис. вяжущее ПВ (контр.) фр. м <sup>2</sup> /кг: 150 (15%) + 300 (75%) + 450 (10%) контр. | -  | 400  | 400  | 400  | 400  | 340  |
| МК (15%)  | -  | -    | -    | -    | -    | 60   |
| Гипс. камень (3%)   | -  | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   |
| Melflux 5581 F (0,3%)   | -  | -    | 1,2  | -    | 1,2  | 1,2  |
| Полидон-А (0,2%)  | -  | -    | -    | 0,8  | 0,8  | 0,8  |
| В/Ц   | 0,3  | 0,26 | 0,18 | 0,21 | 0,17 | 0,20 |
| Сроки схват. цем.теста, ч-мин   | 2-55   | 1-32 | 2-05 | 2-15 | 2-10 | 2-20 |
| нач. схв. / кон. схв.   | 8-20   | 6-15 | 7-10 | 7-25 | 7-20 | 7-30 |
| $R_{\text{сж}}$ 3 сут., МПа   | 18,4   | 23,2 | 24,8 | 24,0 | 25,8 | 26,5 |
| $R_{\text{сж}}$ 28 сут., МПа  | 43,5   | 52,4 | 60,8 | 59,2 | 65,5 | 82,5 |

Анализ данных табл. 3 показал, что в составе 2 снизилось В/Ц на 13,3% и сократились сроки схватывания; прочность на сжатие в возрасте 3 и 28 сут. увеличились на 26,1 и 20,5% в сравнении с составом 1. При добавлении к ПВ Melflux 5581F (состав 3) снизилось В/Ц на 30,8%; при этом сроки схватывания увеличились, а прочность в возрасте 3 и 28 сут. повысилась на 6,9 и 16% в сравнении с составом 2. В составе 4 (ПВ+Полидон-А) повысилось В/Ц на 16,7% и

увеличились сроки схватывания; прочность в возрасте 3 и 28 сут. незначительно снизилась с 24,8 до 24,0 и 60,8 до 59,2 МПа в сравнении с составом 3. Совместное введение в ПВ (суперпластификатора Melflux 5581F + Полидон-А) положительно повлияло на водопотребность и прочность: В/Ц снизилось на 34,6%, прочность в возрасте 3 и 28 сут. увеличилась на 11,2 и 25% в сравнении с контр. (состав 2). Максимальную прочность 82,5 МПа показал состав 6, содержащий активную минеральную добавку микрокремнезем марки МКУ-95, наличие которого позволит решить задачу коррозионной стойкости. Фазовый состав образцов цементного камня, рассчитанный на основе полученных данных РФА, представлен на рис. 2. и в табл. 4.

а)



б)

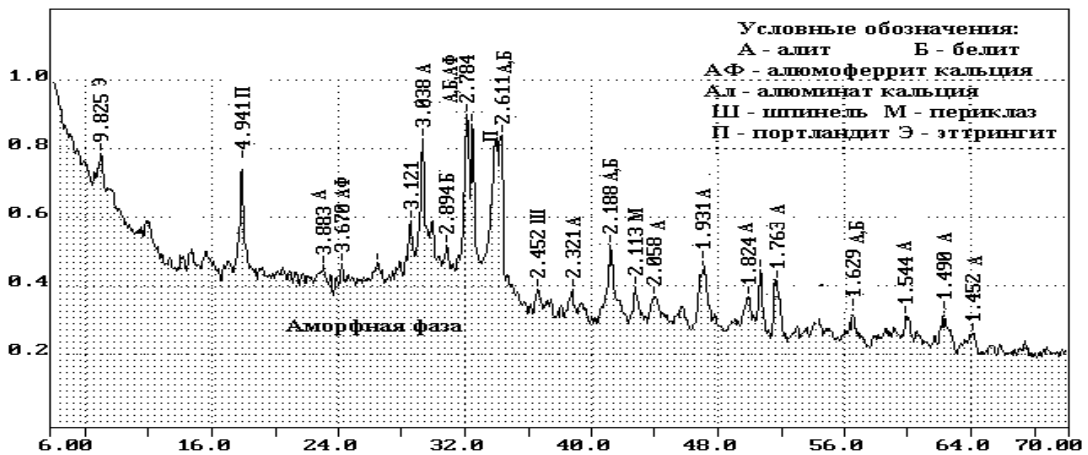


Рисунок 2 – Рентгенофазовый анализ гидратированных образцов цементного камня в возрасте 28 суток твердения: а) 1 состав – ЦЕМ I 42,5Н  
б) ПВ+CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O+Melflux+Полидон-А+МК

Результаты рентгенофазового анализа (табл. 4) показали, что в составе 2 (ПВ) увеличилось содержание  $C_3S$  и  $C_2S$  в сравнении с составом 1, а степень гидратации снизилась с 70 до 52% соответственно.

Таблица 4 – Фазовый состав цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения

| №   | Цементный камень  | Фазовый состав цементного камня, % |        |           |                          |                    |
|---|---|------------------------------------|--------|-----------|--------------------------|--------------------|
|   |   | $C_3S$                             | $C_2S$ | Эттрингит | Портландит<br>$Ca(OH)_2$ | Степень гидратации |
| 0   | ЦЕМ I 42,5Н цемент  | 60,92                              | 11,8   | -         | -                        | -                  |
| 1   | ЦЕМ I 42,5Н (гидрат. цем. камень) завод.  | 24                                 | 20     | 2-3       | 20,5                     | 70                 |
| 2   | ПВ с фр. $m^2/kg$ :<br>150 (15%) + 300(75%)<br>+ 450 (10%) + 3% гип.<br>камень (контр.) | 30                                 | 22     | 2         | 18,4                     | 52                 |
| 3   | ПВ + 0,3 % Melflux  | 28                                 | 21     | 2         | 19,3                     | 54                 |
| 4   | ПВ + 0,2 % Полидон-А  | 27                                 | 22     | до 2      | 18,5                     | 51                 |
| 5   | ПВ + 0,3 % Melflux+<br>0,2 % Полидон-А  | 26                                 | 20     | до 2      | 17,2                     | 57                 |
| 6   | ПВ + 0,3 % Melflux<br>+ 0,2 % Полидон-А<br>+ 15 % МК                                    | 25/15*                             | 21/10* | 1/1*      | 13,5/10,4*               | 62/82*             |
| Примечание: * через 6 месяцев нормального твердения |   |                                    |        |           |                          |                    |

Уменьшение степени гидратации объясняется наличием в составе 2 крупных негидратированных зерен вяжущего (фракция 150  $m^2/kg$ ), которые образуют запас клинкерного фонда. При добавлении к ПВ отдельно Melflux и Полидон-А (составы 3 и 4) наблюдалось незначительное снижение  $C_3S$  и  $C_2S$  на 2-3% в сравнении с контрольным (состав 2). Совместное их введение в ПВ (состав 5) показало незначительное снижение основных клинкерных минералов, при этом степень гидратации увеличилась до 57% в сравнении 3 и 4 составом.

Для повышения стойкости цементного камня против коррозии выщелачивания в состав 6 добавили (15% МКУ-95). При этом содержание остаточных клинкерных минералов снизилось незначительно, а количество  $Ca(OH)_2$  уменьшилось более чем на 26,6% в сравнении с контрольным. Этот факт является свидетельством протекания пуццолановой реакции, сопровождающейся

связыванием  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  микрокремнеземом в менее растворимые и более химически стойкие низкоосновные гидросиликаты кальция.

Для подтверждения гипотезы о сохранности клинкерного фонда и его постепенного вовлечения в процесс структурообразования на длительных сроках твердения, состав 6\* дополнительно исследовали через 6 месяцев. При этом установлено снижение  $\text{C}_3\text{S}$  с 25 до 15%,  $\text{C}_2\text{S}$  с 21 до 10%, портландита с 13,5 до 10,4% и увеличение степени гидратации с 62 до 82% соответственно в сравнении с составом 6 (28 сут. норм. твердения). Полученные результаты свидетельствуют о положительной роли клинкерного фонда в цементном камне (запас грубодисперсных частиц –  $S_{\text{уд}}=150 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), что в дальнейшем должно повысить долговечность бетона, выполненного на его основе.

Исследования микроструктуры цементного камня показали (рис.3), что наличие в составе комплексного модификатора (рис. 3, в) позволило получить плотный цементный камень упорядоченной структуры с равномерно распределенными порами по всему объему при скоплении игольчатых кристаллов этtringита в зоне образования микропор.

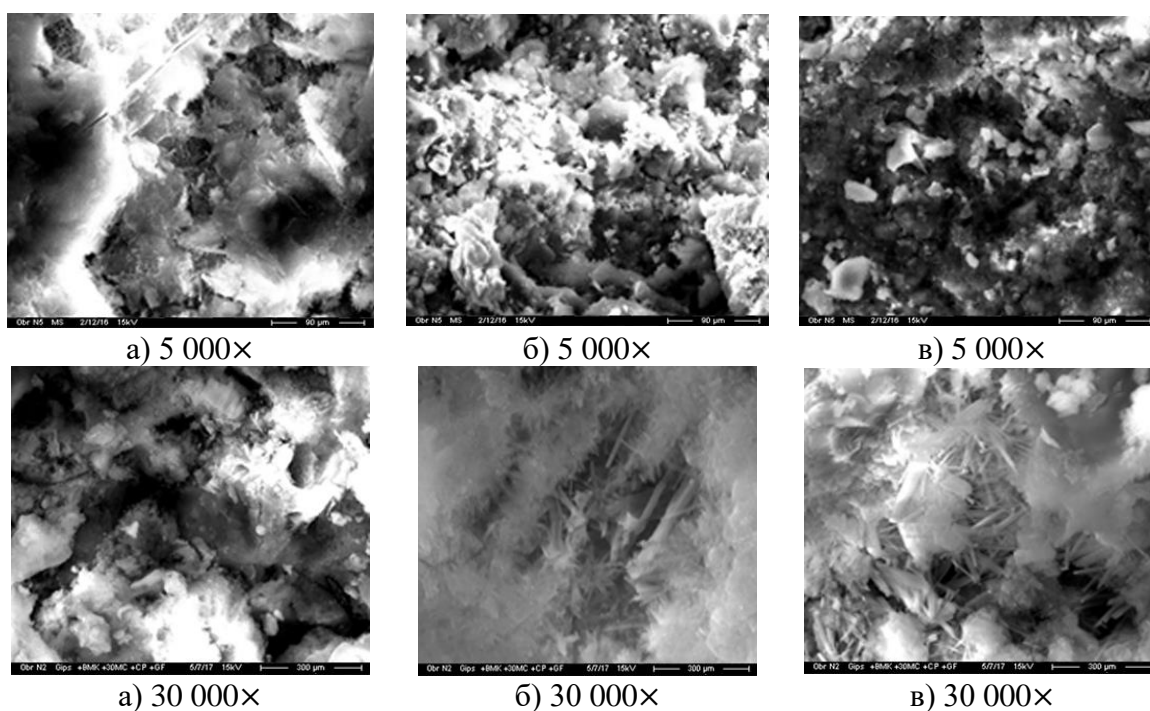


Рисунок 3 – Микроструктура цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения : а) Полидисперсное вяжущее - ПВ (контрольный); б) ПВ+(0,3%Melflux+0,2%Полидон-А); в) ПВ+(0,3% Melflux+0,2%Полидон-А+15% МК)



Установлено, что в составе 5 (табл. 4) уменьшаются размеры кристаллов – от 70 до 90 нм (рис.3, б), и составе 6 (табл. 4) – от 60 до 75 нм (рис.3, в), что значительно ниже, чем в контрольном 2 (табл. 4) – от 100 до 120 нм (рис.3, а).

Модифицированный цементный камень (состав 6, табл.4) имеет более плотную и однородную мелкопористую структуру с размером микропор от 0,1 до 0,6 мкм (рис. 3, в); в составе 5 (табл.4) основной диапазон от 0,5 мкм до 2 мкм (рис.3, б); в контрольном образце состав 2 (табл.4) – от 1 до 5 мкм (рис.3, а), с присутствием пор до 50 мкм.

Положительные изменения в предлагаемом составе 6 обусловлены совместным влиянием комплексного модифицирования (0,3%Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК), сопровождающегося водоредуцирующим эффектом и образованием дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция. Результаты исследований модифицированного цементного камня легли в основу разработки состава тяжелого бетона с заданным комплексом эксплуатационных свойств. В табл. 5 приведены составы тяжелого бетона на которых проводились дальнейшие исследования.

Таблица 5 – Исследуемые составы модифицированного тяжелого бетона

| Материалы                | Расход на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup> |      |      |      |      |      |
|--------------------------|--|------|------|------|------|------|
|                          | 1 контр.   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| ЦЕМ I 42,5Н              | 362  | -    | -    | -    | -    | -    |
| Полидис. вяжущее         | -  | 362  | 362  | 362  | 308  | 308  |
| МК (15%)                 | -  | -    | -    | -    | 54   | 54   |
| Вода                     | 180  | 180  | 180  | 180  | 180  | 180  |
| Щебень                   | 962  | 962  | 962  | 962  | 962  | 962  |
| Песок                    | 895  | 895  | 895  | 895  | 895  | 895  |
| Melflux 5581F (0,3%)     | 1,09   | 1,09 | -    | 1,09 | 1,09 | 1,09 |
| Полидон-А (0,2%)         | -  | -    | 0,72 | 0,72 | 0,72 | 0,72 |
| Базальт. волокно (0,7 %) | -  | -    | -    | -    | -    | 2,16 |

Анализ исследований (табл. 6) свойств бетонных смесей показал, что предлагаемый состав 6 снизил в 2,1 и 2,2 раза показатели водоотделение и раствооротделения в сравнении с контрольным. Этот факт имеет положительную роль при снижении негативных последствий: расслоение бетонной смеси, оседания крупного заполнителя и снижение неоднородности бетона. Анализ результатов свойств модифицированных бетонов показал повышение показателей: на сжатие в

составе ПВ+(0,3%Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК) на 47,9% относительно контрольного (ПЦ+0,3%Melflux) и на 19,5% относительно состава (ПВ+0,3%Melflux), что составляет в абсолютном выражении на 24 и 12 МПа соответственно.

Таблица 6 – Свойства модифицированных бетонных смесей и бетонов

| Показатели  | Составы                           |                             |                                   |  |   |  |
|---|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--|---|--|
|   | 1<br>контр.<br>ПЦ+<br>0,3%Melflux | 2<br>ПВ<br>+0,3%<br>Melflux | 3<br>ПВ<br>+0,2%<br>Полидон-<br>А | 4<br>ПВ+ 0,3%<br>Melflux+<br>0,2%<br>Полидон-А | 5<br>ПВ+ (0,3%<br>Melflux+<br>0,2%<br>Полидон-А<br>+ 15%МК) | 6<br>ПВ+(0,3%<br>Melflux+<br>0,2%<br>Полидон-А<br>+15%МК)<br>+0,7%БВ |
| Удобоукладываемость<br>Марка/ОК, см               | П2/5                              | П2/6                        | П2/5                              | П2/6   | П2/7  | П2/5   |
| Водоотделение<br>бет.см., %                       | 0,45                              | 0,31                        | 0,24                              | 0,20   | 0,19  | 0,22   |
| Раствороотделение Пр, %                           | 2,8                               | 1,44                        | 1,37                              | 1,34   | 1,32  | 1,28   |
| Средняя<br>плотность<br>бетона, кг/м <sup>3</sup> | 2401                              | 2408                        | 2406                              | 2411   | 2420  | 2417   |
| Пористость, %                                     | 14,52                             | 11,67                       | 10,54                             | 10,12  | 9,2   | 8,6  |
| R <sub>сж</sub> (ср.), МПа,                       | 50,1                              | 62,0                        | 59,8                              | 62,1   | 74,1  | 77,3   |
| R <sub>тб</sub> (ср.), МПа,                       | 5,78                              | 6,54                        | 6,27                              | 6,93   | 7,73  | 8,62   |
| K <sub>с*</sub> , МПа×м <sup>0,5</sup>            | 0,052638                          | 0,055393                    | 0,055620                          | 0,058872                                       | 0,061458  | 0,074169   |

Максимальный прирост прочности R<sub>тб</sub> имеет бетон с базальтовым волокном (состав 6). Показатель R<sub>тб</sub> повысился на 49,1% в сравнении с контрольным и на 11,5% в сравнении с составом 5 (без фибры).

По результатам гидрофизических испытаний модифицированного бетона (состав 6, табл.5) установлено: водопоглощение снизилось на 57,8%; марка по водонепроницаемости повысилась на 4 ступени нагружения в сравнении с контрольным. Результаты испытаний на морозостойкость показали:

- максимальное снижение массы до 6,32% и кубиковой прочности на 26% в контрольном составе 1 после 400 циклов испытаний (рис.4), что превышает установленные показатели требования ГОСТ 10060-2012;
- высокую морозостойкость составы, содержащие комплексный модификатор. При

600 циклов испытаний потеря массы в составах 5 и 6 составила 1,8% и 1,5% при снижении прочности на 10,2% и 9,1% соответственно, что подтверждает достаточный запас прочности и морозостойкости.

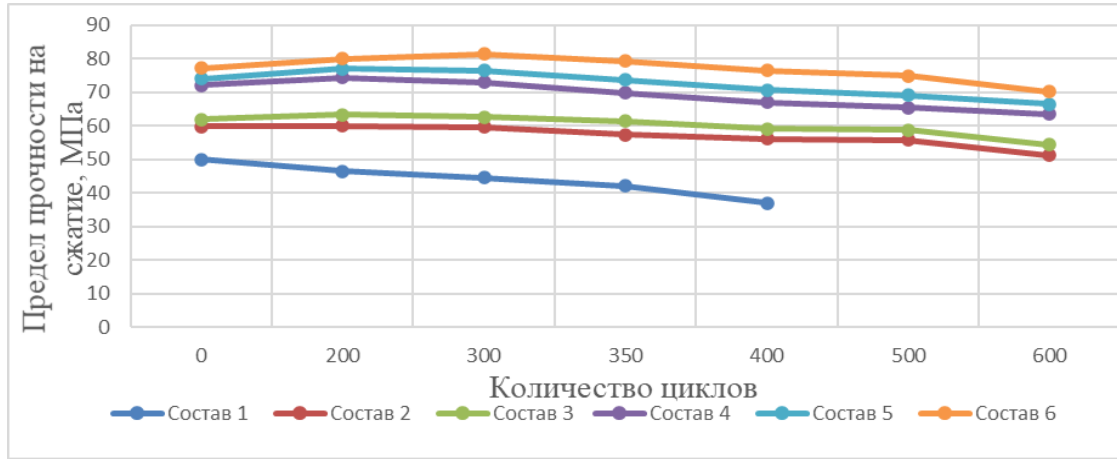


Рисунок 4 – Графическая интерпретация результатов испытаний образцов бетона при циклическом попеременном замораживании и оттаивании:

1 – контрольный заводской ПЦ + 0,3% Melflux; 2 – ПВ + 0,3% Melflux; 3 – ПВ + 0,2% Полидон-А; 4 – ПВ + (0,3% Melflux + 0,2% Полидон-А); 5 – ПВ + (0,3% Melflux + 0,2% Полидон-А + 15% МК); 6 – ПВ + (0,3% Melflux + 0,2% Полидон-А + 15% МК) + 0,7% БВ

Косвенным доказательством, что комплексное модифицирование (состав 6, табл.5) способствует повышению морозостойкости бетона, могут быть результаты испытаний на водопоглощение, полученные до и после испытания их при циклическом попеременном замораживании и оттаивании (рис.5).

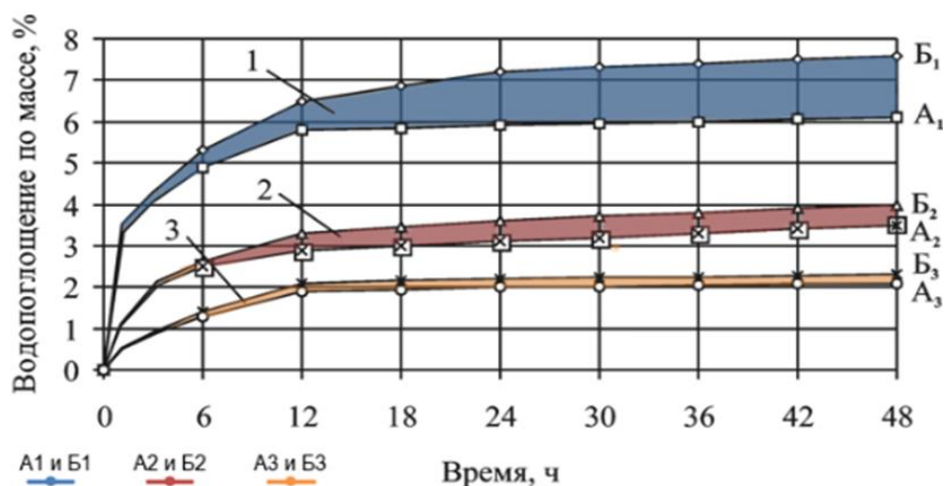


Рисунок 5 – Водопоглощение бетонов до и после испытания при циклическом попеременном замораживании и оттаивании:

1 – А<sub>1</sub> и Б<sub>1</sub> – контрольный заводской ПЦ + 0,3% Melflux соответственно до и после испытания при циклическом попеременном замораживании и оттаивании;  
 2 – А<sub>2</sub> и Б<sub>2</sub> – ПВ + 0,3% Melflux; 3 – А<sub>3</sub> и Б<sub>3</sub> – ПВ + (0,3% Melflux + 0,2% Полидон-А + 15% МК) + 0,7% БВ

Установлено, что исследуемые составы после 300 циклов испытаний имеют различные показатели: прирост водопоглощения контрольного состава (ПЦ+0,3%Melflux) составил  $\approx 26\%$ , состава (ПВ+0,3%Melflux)  $\approx 12\%$ , а с комплексным модификатором  $\approx 5-7\%$ .

Исследования воздействия различных жидких агрессивных сред были проведены на образцах (состав 6, табл. 5). При выдерживании образцов в 3% растворе NaCl потеря массы  $\Delta m_{cp}$  составила  $-0,090\%$ , прочности на сжатие  $\Delta R_{cp}$   $-0,146\%$ , при изгибе  $\Delta R_{tb}$   $-0,132\%$  соответственно. В растворе соляной кислоты 0,01% HCl наблюдалось уменьшение снижения потери средней массы  $\Delta m_{cp}$  на 45,7%, предела прочности на сжатие  $\Delta R_{cp}$  на 56,3%; растяжение при изгибе  $\Delta R_{tb}$  на 65,9%, в сравнении с контрольным составом 1 соответственно. Исследования по коррозии выщелачивания показали следующие результаты изменений – уменьшение снижения: потери средней массы  $\Delta m_{cp}$  – на 21,2%, предела прочности на сжатие  $\Delta R_{cp}$  – на 47,5%; растяжение при изгибе  $\Delta R_{tb}$  – на 48,4%, в сравнении с контрольным составом 1 соответственно. При выдерживании в 5% растворе ( $Na_2SO_4$ ) в 6 составе наблюдалось увеличение прироста массы  $\Delta m_{cp}$  – на 66,6%, при этом повысились  $\Delta R_{cp}$ , – на 60,6% и  $\Delta R_{tb}$  – на 87,6% относительно контрольного (состав 1) соответственно. Таким образом доказана положительная роль микрокремнеземистого компонента, участвующего в образовании низкоосновных гидросиликатов кальция.

В **пятой главе** представлены результаты внедрения, которые показали состоятельность и техническую эффективность предлагаемого модифицированного тяжелого бетона. На основании разработанного ТУ 236112-016-80769602-2023 «Эффективный модифицированный тяжелый бетон для производства железобетонных лотков», утверждённого ООО «ИнжСпецСтрой» были изготовлены в заводских условиях «Технология-Тула» водоотводные лотки серий: GRENT MegaT500 – 220 шт; ЛР-6 – 200 шт.

Экономический эффект от применения модифицированного бетона на 1 м<sup>3</sup> составил  $\approx 394$  руб. (по ценам 2023 г.).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Итоги выполненного исследования:

1. Обосновано и экспериментально доказано создание структуры тяжелого бетона высокой плотности, рационально сочетающего необходимые технологические и эксплуатационные характеристики, путем оптимизации состава цементного вяжущего различной дисперсности с комплексным модификатором (суперпластификатор+полимер+микрокремнезем) + базальтовое волокно. Модифицированный бетон обладает следующими показателями: предел прочности на сжатие – 77,3 МПа; предел прочности на растяжение при изгибе – 8,62 МПа;  $K_c^*$  – 0,074169 МПа $\times$ м<sup>0,5</sup>, водопоглощение – 1,9%; марка по водонепроницаемости – W14; морозостойкость  $F_1 = 600$ , повышенная стойкость к агрессивным средам.

2. С помощью программно-расчетного комплекса «Drop and Roll» определен оптимальный состав цементного вяжущего: 15% частиц –  $d_{cp} = 12$  мкм и  $S_{уд} = 150$  м<sup>2</sup>/кг; 75% –  $d_{cp} = 6,6$  мкм,  $S_{уд} = 300$  м<sup>2</sup>/кг; 10% –  $d_{cp} = 4,9$  мкм,  $S_{уд} = 450$  м<sup>2</sup>/кг.

3. При помощи методов математического планирования эксперимента и регрессионного анализа установлен оптимальный состав модифицированного тяжелого бетона. Определены оптимальные дозировки Полидон-А – 0,2% и базальтового волокна – 0,7% от массы вяжущего, при которых  $R_{сж} = 77,3$  МПа,  $K_c^* = 0,074$  МПа $\times$ м<sup>0,5</sup>,  $W_m = 1,9$  %.

4. Рентгенофазовый анализ показал, что в составе ПВ+ (0,3% Melflux+0,2% Полидон-А+15% микрокремнезем) снизилось содержание основных клинкерных минералов, количество Ca(OH)<sub>2</sub> уменьшилось более чем на 26% за счет протекания пуццолановой реакции, а степень гидратации увеличилась до 62% в сравнении с контрольным. При испытании цементного камня в возрасте 6 месяцев наблюдалось увеличение степени гидратации до 82%.

5. С помощью микроструктурного анализа установлена плотная упорядоченная структура цементного камня ПВ+(0,3%Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК) с размерами кристаллов от 60 до 75 нм и скоплением игольчатых кристаллов этtringита в зоне образования микропор от 0,1 до 0,6 мкм.

6. Установлено увеличение прочностных показателей: на сжатие в составе ПВ+(0,3%Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК) на 47,9% относительно контрольного

(ПЦ+ 0,3%Melflux) и на 19,5% относительно состава (ПВ+0,3%Melflux), что составляет в абсолютном выражении на 24 и 12,1 МПа соответственно. Показатель  $R_{tb}$  повысился у состава бетона с базальтовым волокном на 49,1% в сравнении с контрольным и на 11,5% в сравнении с составом (без фибры). Повысились показатели максимальной нагрузки на 40,92% и условного коэффициента интенсивности напряжений на 40,60%, напряжение при изгибе на 35,1% в сравнении с контрольным.

7. Установлено улучшение гидрофизических свойств модифицированного бетона: водопоглощение снизилось на 57,8%; марка по водонепроницаемости повысилась на 4 ступени нагружения в сравнении с контрольным составом. При 600 циклов испытания на морозостойкость потеря массы составила 1,5-1,8% и снижение прочности на 9,1%-10,2%.

8. При выдерживании образцов модифицированного бетона в 3% растворе NaCl потеря массы  $\Delta m_{cp}$  составила – 0,090%, прочности на сжатие  $\Delta R_{cp}$  – 0,146%, при изгибе  $\Delta R_{tb}$  – 0,132% соответственно. При выдерживании в растворе соляной кислоты 0,01% HCl наблюдалось уменьшение снижения потери средней массы  $\Delta m_{cp}$  – на 45,7%, предела прочности на сжатие  $\Delta R_{cp}$  – на 56,3%; растяжение при изгибе  $\Delta R_{tb}$  – на 65,9%, в сравнении с контрольным составом. Исследования по коррозии выщелачивания показали следующие результаты изменений – уменьшение снижения:  $\Delta m_{cp}$  – на 21,2%,  $\Delta R_{cp}$  – на 47,5%;  $\Delta R_{tb}$  – на 48,4%, в сравнении с контрольным составом соответственно. При выдерживании в 5% растворе ( $Na_2SO_4$ ) наблюдалось увеличение прироста массы  $\Delta m_{cp}$  – на 66,6%, при этом повысились  $\Delta R_{cp}$ , – на 60,6% и  $\Delta R_{tb}$  – на 87,6% относительно контрольного состава.

9. Проведено опытно-производственное апробирование предлагаемых решений. Выпущена опытная партия водоотводных лотков серии GRENT MegaT 500 в количестве 220 шт. и лотков оросительных систем ЛР-6 в количестве 200 шт. Экономический эффект от применения модифицированного бетона на 1 м<sup>3</sup> составил  $\approx$  394 руб.

**Перспективы и рекомендации дальнейшей разработки темы диссертации** заключаются в совершенствовании состава модифицированного тяжелого бетона основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором путем поиска новых видов модификаторов и микроармирующих наполнителей с целью снижения себестоимости продукции и исследовании возможностей его применения в гидротехнических сооружениях зоны переменного уровня воды.

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ  
ДИССЕРТАЦИИ:**

**Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ:**

1. Ткач Е.В., Садчикова Ю.С. Улучшение эксплуатационных свойств бетона для гидромелиоративного строительства // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2019. № 4 (1016). С.64-65.

2. Величко Е.Г., Шумилина Ю.С. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона // Вестник МГСУ. 2020. №2 (2020). С.235-243 DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.235-243.

3. Величко Е.Г., Шумилина Ю.С., Талипов Л.Н. Многокомпонентность – основной фактор формирования структуры и свойств высокопрочных бетонов // Строительство и реконструкция. 2020. № 2 (88). С.16-24. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-16-24.

4. Филимонова Ю.С., Величко Е.Г. Исследование комплексной модификации тяжелого бетона // Строительство и реконструкция. 2021. №4 (96). С.107-109 DOI: 10.33979/2073-7416-2021-96-4-107- 112.

5. Ткач Е.В., Филимонова Ю.С., Корнеев А.И. Тяжелый бетон на основе полидисперсного вяжущего с комплексным полимерным модификатором с повышенными эксплуатационными показателями // Строительство и реконструкция. 2022. № 2 (100). С. 112-119. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-112-119.

6. Каддо М.Б., Филимонова Ю.С. Исследование модифицированного тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным полимерным модификатором // Техника и технология силикатов. - 2022. №1 - С. 37-44.

7. Tkach E.V., Filimonova YU.S. Модифицированный тяжелый бетон на основе полидисперсного вяжущего для гидромелиоративного строительства // Техника и технология силикатов. 2022. Т. 29. № 4. С. 326-334.

**Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science:**

8. Tkach E., Sadchikova Y. Resource-saving materials based on hydrophobic low water demand binder // В сборнике: MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196, 04031.

9. Tkach E., Sadchikova Y. Efficient modified concrete for irrigation and drainage facilities construction // В сборнике: MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251, 01041.

10. Tkach E., Semenov V., Shumilina Y. Optimization of the composition and technological processes of dispersed cement systems with high performance properties // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1030(1), 012024. DOI:10.1088/1757-899X/1030/1/012024.

11. Tkach E., Filimonova Y. Modified concrete for irrigation and drainage construction // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 410. DOI:10.1051/e3sconf/202341001007.

**Статьи, опубликованные в других изданиях:**

12. Ткач Е.В., Шумилина Ю.С. Оптимизация параметров получения дисперсных цементных систем // В сборнике: Актуальные проблемы строительной отрасли и образования. Сборник докладов Первой Национальной конференции. 2020. С. 269-276.

**Свидетельства, патенты и др. результаты интеллектуальной деятельности, зарегистрированные в установленном порядке:**

13. Садчикова Ю.С. База данных способов приготовления органоминеральных комплексных модификаторов гидрофобизирующего действия для повышения эксплуатационной надежности железобетонных изделий в условиях воздействия агрессивных сред. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620513, 01.04.2019 г.