

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Ткач Евгения Владимировна

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 5 |
| ГЛАВА 1 Состояние вопроса и задачи исследования..... | 12 |
| 1.1 Анализ производства и применения бетонов для гидротехнического строительства..... | 12 |
| 1.2 Управление внутренней структурой вяжущих материалов как системы топологического беспорядка..... | 17 |
| 1.3 Использование модификаторов для повышения качества структуры и свойств тяжелого бетона | 25 |
| 1.3.1 Добавки, регулирующие свойства бетонных смесей и их применение в цементных системах | 27 |
| 1.3.2 Опыт применения добавок-полимеров в цементные бетоны..... | 41 |
| 1.3.3 Предпосылки использования микрокремнезема для улучшения коррозионной стойкости цементных материалов | 43 |
| Выводы по главе 1 | 47 |
| ГЛАВА 2 Характеристика исходных материалов и методы исследования.... | 49 |
| 2.1 Методы исследований | 49 |
| 2.1.1 Получение тонкодисперсных фракций клинкерного компонента | 51 |
| 2.1.2 Моделирование упаковок зернистых систем и расчет оптимальной гранулометрии..... | 53 |
| 2.1.3 Рентгенофазовый анализ | 54 |
| 2.1.4 Исследование физико-механических характеристик бетонных образцов | 54 |
| 2.1.5 Определение морозостойкости бетона | 59 |
| 2.1.6 Определение водопоглощения, водонепроницаемости и пористости бетона | 60 |
| 2.1.7 Определение коррозионной стойкости бетонных образцов | 62 |
| 2.2 Характеристики исходных материалов | 64 |
| 2.2.1 Гидравлическое вяжущее вещество | 64 |

| | |
|---|-----|
| 2.2.2 Крупный и мелкий заполнитель | 67 |
| 2.2.3 Вода затворения | 68 |
| 2.2.4 Суперпластифицирующая добавка «Melflux 5581 F» | 68 |
| 2.2.5 Полимерная добавка «Полидон-А» | 69 |
| 2.2.6 Микрокремнезем МКУ-95 | 69 |
| 2.2.7 Микроармирующий компонент в виде базальтового волокна..... | 72 |
| | |
| ГЛАВА 3 Теоретические основы и предпосылки для разработки предварительного состава модифицированного тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с полимерно-минеральным модификатором | 73 |
| 3.1 Предпосылки модифицирования тяжелого бетона | 73 |
| 3.2 Разработка предварительного состава модифицированного тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным полимерным модификатором..... | 76 |
| 3.3 Определение оптимального состава цементного вяжущего различной дисперсности с применением программно-расчетного комплекса на основе метода «Drop and Roll» | 80 |
| 3.4 Построение ортогонального центрального планирования второго порядка с целью подбора оптимального состава модифицированного тяжелого бетона .. | 87 |
| Выводы по главе 3..... | 91 |
| | |
| ГЛАВА 4 Исследования влияния комплексного модификатора на свойства модифицированного тяжелого бетона | 93 |
| 4.1 Рентгенофазовый и микроструктурный анализы продуктов гидратации цементного камня в присутствии суперпластификатора, полимера и микрокремнезема | 93 |
| 4.2 Исследуемые составы модифицированного тяжелого бетона с учетом расхода и подбора сырьевых материалов | 101 |
| 4.3 Технологические свойства разработанных бетонных смесей | 102 |
| 4.4 Физико-механические свойства разработанного модифицированного тяжелого бетона..... | 104 |

| | |
|--|-----|
| 4.4.1 Прочность на сжатие | 104 |
| 4.4.2 Прочность бетона на растяжение при изгибе | 106 |
| 4.4.3 Трещиностойкость | 108 |
| 4.5 Гидрофизические показатели модифицированного тяжелого бетона..... | 113 |
| 4.6 Коррозионная стойкость..... | 117 |
| Выводы по главе 4..... | 120 |
| ГЛАВА 5 Опытно-производственные работы по внедрению тяжелого модифицированного бетона в технологию железобетонных лотков оросительных систем | 123 |
| 5.1 Техническая эффективность и эксплуатационные свойства тяжелого модифицированного бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором..... | 123 |
| 5.2 Экономическая эффективность применения разработанного состава тяжелого бетона, модифицированного комплексной добавкой..... | 127 |
| 5.3 Опытное апробирование эффективного модифицированного тяжелого бетона для производства железобетонных лотков оросительных систем | 131 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 135 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 138 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А. ТУ 236112-016-80769602-2023 «Тяжелый бетон на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором для производства железобетонных лотков оросительных систем»..... | 157 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Свидетельство о государственной регистрации базы данных | 167 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акт о внедрении результатов исследований | 168 |

ВВЕДЕНИЕ

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 микрокремнеземистого 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 $S_{уд} = 150$ м²/кг; 75% – $d_{cp} = 6,6$ мкм, $S_{уд} = 300$ м²/кг; 10% –

$d_{cp} = 4,9$ мкм, $S_{уд} = 450$ м²/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 ($S_{уд} = 450$ м²/кг) позволяет обеспечить высокие темпы роста прочности в ранние сроки твердения, а грубодисперсный порошок ($S_{уд} = 150$ м²/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 МПа×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 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.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ производства и применения бетонов для гидротехнического строительства

Строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений получает массовое внедрение в РФ, создавая эффективные условия использования мелиорируемых земель и их плодородия. Это положение функционально связано с долговечностью и надежностью широкой разветвленной системы эксплуатируемых гидротехнических сооружений.

К бетону для изготовления гидромелиоративных конструкций устанавливают требования, отличные от требований для бетонов, применяемых в промышленном и гражданском, в том числе и гидротехническом, строительстве. Такие специальные требования обусловлены, прежде всего, сложными условиями эксплуатации гидромелиоративных конструкций.

Под воздействием целого комплекса агрессивных факторов окружающей среды тонкостенные гидромелиоративные конструкции разрушаются, что в свою очередь снижает их проектный срок службы. Замена разрушенных лотков связана не только со значительными затратами, но также и с выходом из строя на некоторое время (порой самое неподходящее) всей оросительной системы, а следовательно, с потерями части урожая сельскохозяйственных культур [1-3].

Увеличить долговечность и повысить эксплуатационную надежность мелиоративных сооружений возможно применением специальных защитных облицовок (монолитных и сборных), которые снижают фильтрацию воды через рабочие поверхности каналов.

Применение противофильтрационных облицовок позволяет удерживать потери воды при транспортировке на уровне 15-20%. Целостность тонких покрытий (толщиной 0,2 мм) нарушается даже от незначительных механических воздействий, что является основной проблемой при их использовании.

Поэтому постоянно идет поиск эффективных материалов, в частности,

полимерных композиций, способных противостоять как механическим воздействиям, так и выдерживать агрессивное воздействие окружающей среды.

К сожалению, часто предлагаемые полимерные композиции предполагают использование дорогостоящих химических компонентов, что затрудняет их широкое использование. Поэтому основой мелиоративного строительства по-прежнему являются бетоны с использованием вяжущих веществ на основе портландцементного клинкера.

Необходимо отметить, что важными мероприятиями по дальнейшему развитию и совершенствованию мелиоративного и водохозяйственного строительства являются улучшение качества работ, максимальное сокращение сроков и снижение стоимости строительства, а также рациональное использование свойств, применяемых строительных материалов и повышение их качества.

Мелиоративные системы представляют собой комплексы взаимосвязанных гидротехнических и других сооружений, и устройств (каналы, коллекторы, трубопроводы, водохранилища, плотины, дамбы, насосные станции, водозаборы, другие сооружения и устройства), обеспечивающих создание оптимальных водного, воздушного, теплового и питательного режимов почв на мелиорированных землях [4, 5].

При гидромелиоративном строительстве, носящем сложный комплексный характер, возводится большое количество разнообразных зданий и сооружений, включающих объекты гидроэнергетического и водотранспортного назначения, водоснабжения и обводнения, рыбного хозяйства. На территории гидромелиоративной системы, помимо огромного числа каналов и гидросооружений на них, одновременно строятся дороги, индустриальные жилые и культурно-бытовые здания поселкового и городского типов, возводятся здания для ремонта и хранения землеройной и другой техники (ремонтные мастерские, гаражи, склады), заводы железобетонных изделий и конструкций, предприятия по переработке продуктов сельского хозяйства, административные здания управления оросительной системой гидроузла [6].

Упомянутые здания и сооружения на территории этой системы возводятся в основном из тех же материалов, конструкций и деталей, что и обычные гражданские и промышленные здания и сооружения. Исключение составляют лишь монументальные сооружения и здания гигантских уникальных гидроузлов, где специфичные природные условия и высокие архитектурные требования предполагают разработку индивидуальных проектов и применение материалов повышенной плотности, прочности, долговечности и надежности, архитектурной выразительности [7].

Различного рода гидросооружения на оросительных и осушительных системах возводятся для создания таких условий движения воды, которые обеспечивали бы проектный расход, уровень, скорость, бесперебойную подачу и распределение воды в заданные места. Различают водозаборные (головные) сооружения гидроузлов; разного назначения каналы (магистральные, меж- и внутрихозяйственные, мелкая распределительная сеть); сооружения на каналах и мелкую арматуру на распределительной сети (водовыпуски в поливные борозды, гидранты, сифоны и т. д.).

В современном гидротехническом и гидромелиоративном строительстве используют преимущественно модифицированные бетоны, которые позволяют обеспечить заданный уровень качества.

Даже небольшое количество модифицирующих компонентов позволяет кардинально изменять процесс структурообразования и получать долговечные бетоны с повышенными физико-механическими характеристиками [8-10].

Практическое применение в гидротехническом строительстве находят многокомпонентные модификаторы на химико-минеральной основе, применение которых позволяет получать плотную долговечную структуру.

В середине прошлого века в нашей стране были построены оросительные системы протяженностью почти две тысячи километров, которые используются до сих пор. Учитывая, что 25-летний проектный срок эксплуатации лотковых каналов закончился уже давно, примерно 25% лотков требуют восстановительного ремонта.

Для устойчивого функционирования распределительной сети оросительных систем должны проводиться периодические ремонтные работы, а также необходим постоянный мониторинг состояния лоткового канала для выявления повреждений и их устранения в сжатые сроки.

Охрана водных ресурсов и разработка эффективных конструкций каналов лотков оросительных систем изучались российскими учеными: Свистунов, Ю.Л. Поляков, И.П. Кружилин, Ю.М. Косиченко, А.В. Колганов, Б.М. Кизяев, В.И., Ольгаренко Л.Ф. [11-16].

На рисунках 1.1 и 1.2 представлены зоны дефектов и повреждения лотковых каналов.

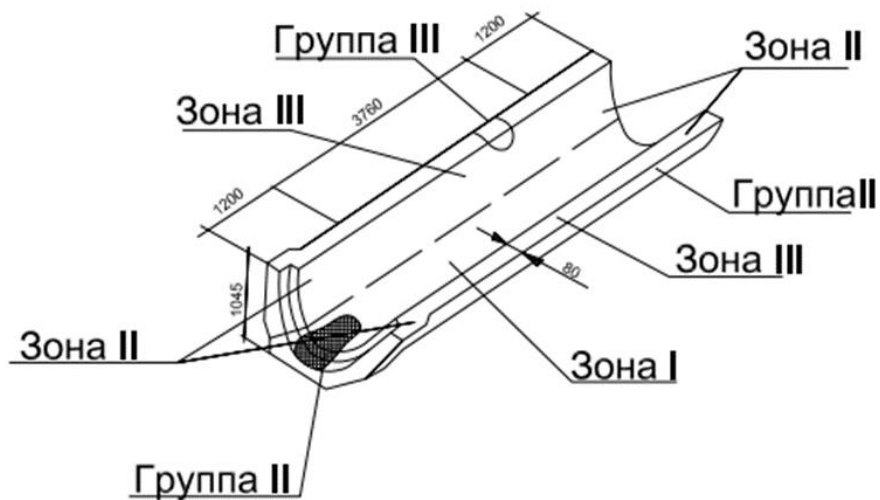


Рисунок 1.1 – Зоны нахождения дефектов элемента лоткового канала [17]

Необходимо отметить, что для предотвращения потерь оросительной воды используются различные способы и направления.

Первое направление в экономии оросительной воды – предотвращение потерь в транспортирующей сети путем облицовки ложа каналов, переход на лотковую и закрытую сеть в трубах.

Второе – создание плотных высокопрочных бетонов, например, полимербетонов.

Технологией изготовления полимербетонов, физико-химическими основами их получения занимались многие ученые, среди которых: М.С. Петров, В.В. Патуроев, В.И. Соломатов, В.А. Вознесенский и другие [18-20]. И.М. Елшин

разрабатывал составы полимербетонов для износостойких долговечных облицовок мелиоративных сооружений и изучал их свойства [21].

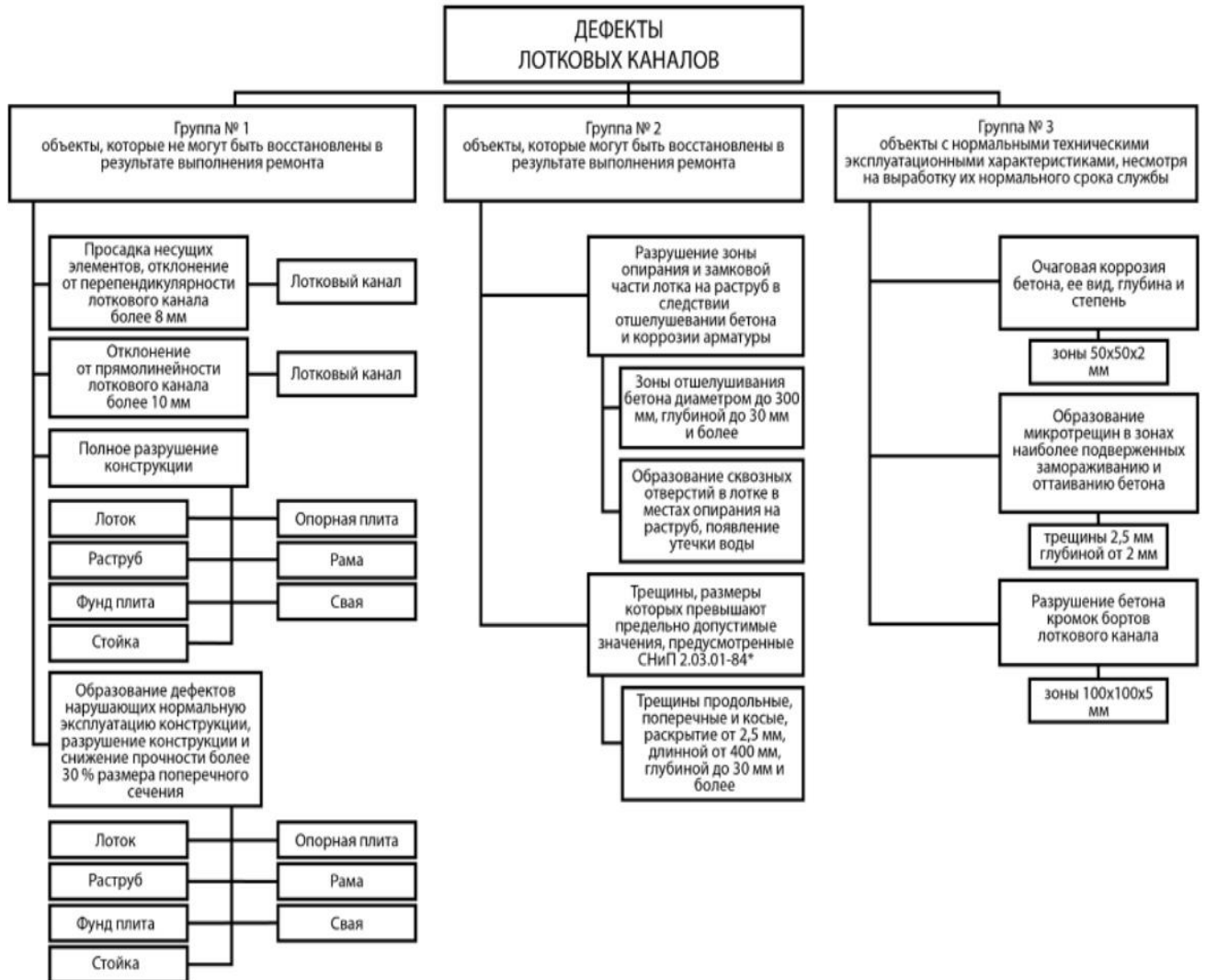


Рисунок 1.2 – Дефекты лотковых каналов оросительных систем [21]

К сожалению, часто предлагаемые полимерные композиции предполагают использование дорогостоящих химических компонентов, что затрудняет их широкое использование. Поэтому основой мелиоративного строительства по-прежнему являются бетоны с использованием вяжущих веществ на основе портландцементного клинкера.

Изучением гидротехнического бетона, вопросами улучшения его строительных и технических характеристик занимались многие ученые: В.Г. Батраков, Г.И. Горчаков, Л.И. Дворкин, М.М. Капкин, С.С. Каприелов, Б.Г. Скрамтаев, В.И. Соловьев, М.М. Хигерович и др. [22-34].

Для получения бетонных смесей с оптимальными реотехнологическими показателями и повышения эксплуатационных свойств затвердевшего бетона рационально и перспективно применение химико-минеральных модификаторов [35-37].

Таким образом, повышение качества бетона для мелиоративного и гидротехнического строительства является проблемным вопросом и требует своего развития с учетом развиваемой на современном этапе технологической парадигмы, предусматривающей использование в его составе полидисперсного вяжущего совместно с комплексным модификатором (суперпластификатор+ полимер+микрокремнезем). Далее рассмотрим в отдельности каждый компонент цементной системы и его роль в создании тяжелого бетона с заданными свойствами по прочности, водонепроницаемости и долговечности.

1.2 Управление внутренней структурой вяжущих материалов как системы топологического беспорядка

Важным аспектом в вопросе оптимизации структуры вяжущих материалов является рассмотрение их структурообразования с точки зрения топологии (геометрии). В этом случае вяжущий материал рассматривается как пространственный объект, состоящий из частей, каждая из которых может быть рассмотрена как частица исходного вяжущего материала или растущий зародыш новой фазы. Их число относится к величинам, не изменяющимся при непрерывных преобразованиях (топологический инвариант) [38].

Состав и наиболее общие геометрические свойства, а также уровни организации структур вяжущего, как структур топологического беспорядка в вяжущих дисперсных системах, т.е. системах, наделённых дискретностью, могут быть описаны в общем случае – для дисперсных систем, в частности – для конденсированных систем или вяжущих и бетонов. Подобные структуры рассматриваются через основные фундаментальные характеристики упорядоченных кристаллических и неупорядоченных систем в виде зернистых и

дисперсных материалов: плотность упаковки элементов (и записывается как $\eta_1 \leq 1$) и координационное число Z [39].

Топология неупорядоченных систем – это взаимное расположение частиц дисперсных (зернистых) материалов и расстояние, на котором они находятся друг от друга, то есть плотность упаковки ближайшего окружения частиц. Известно, что по сравнению с дисперсным веществом, находящемся в сухом состоянии в таких материалах, как композиты, плотность упаковки дисперсных частиц выше, что непосредственно связано с силами поверхностного натяжения между твердой и жидкой фазой. Координационное число показывает, какое количество частиц находится в непосредственном окружении отдельно взятой частицы в дискретной системе, непосредственно контактирующих с центральной сферой (частицей) [39].

Таким образом, величина Z является усреднённой характеристикой и зависит от η_1 . Количество частиц, контактирующих с центральной сферой, напрямую зависит от плотности упаковки системных элементов.

На плотность упаковки частиц влияет не только размер и форма самих дисперсных частиц, но и линейные размеры и форма сосуда, в котором располагается дисперсная фаза [39].

Исследование дисперсных систем возможно при помощи создания трехмерной модели изучаемой структуры с применением твердых сфер [40, 41-43].

На модели возможно представить взаимное расположение частиц в трехмерном пространстве, определяемое координационным числом и плотностью упаковки в дисперсной системе. Таким образом моделируется и решается задача плотной пространственной упаковки сферических частиц, что позволяет определить состав разрабатываемого композита. Упорядоченное расположение сфер в рамках исследуемого объема модели позволит получить наибольшую плотность упаковки. [40].

Традиционно под структурной топологией неупорядоченных систем понимается наука о составе, уровнях организации структур топологического

беспорядка и свойствах систем, наделенных дискретностью. Можно рассматривать дискретность неупорядоченных систем на уровне размеров атомов и молекул и их ассоциаций, флуктуаций плотности, кластеров и магнитных доменов, то есть на микроуровне. Макроуровень – это крупные агрегации, блоки, высокоплотные образования.

Если измельчать зернистый материал, сухое агрегирование микрочастиц возникнет в результате уменьшения плотности их упаковки и координационного числа, так как будет усиливаться электростатическое взаимодействие частиц и изменяться строение дисперсного слоя. Последующее измельчение приведет к появлению аномальных магнитных и электрических свойств. Изготовление изделий из композиционных материалов усложняется при наличии значительного количества таких мелкодисперсных наполнителей.

Следует отметить, что появление указанных свойств не всегда является негативным процессом при создании строительных материалов. Подобный эффект, известный как механическая активация, для вяжущих веществ позволяет повысить их вяжущие свойства. Тем не менее, традиционные вяжущие вещества имеют определённый порог удельной поверхности, выше которого применение вяжущих имеет ограничения по времени из-за невозможности остановить описанную выше агломерацию частиц.

При определенной степени измельчения твердая дисперсная фаза изменяет свою структуру как в слое, так и в наполненных композитах.

Для расчета вязкости и термодинамических характеристик жидких металлов необходимо определение координационного числа в зернистом слое, твердой дисперсной фазы в композитах [41, 42, 43].

А.Н. Хархардин предлагает при необходимости оптимизации структуры на микро- и нанодисперсном уровне применение менее сложного метода исследований, который используют в структурной топологии неупорядоченных систем.

Предполагается, что топологическое состояние системы определяют две составляющие: плотность случайной (стохастической) упаковки компонентов структуры и их координационное число.

Общие закономерности распределения элементов структуры, такие как пустоты, плотно заполняемые шарами соответствующего размера, обуславливают необходимые размеры [44].

А.Н. Хархардин и А.И. Топчиев в своих исследованиях [41] предлагают уравнения для расчета координационного числа в неупорядоченных системах.

Средняя плотность упаковки структурных элементов дискретности, как один из основных топологических параметров, используется авторами для оптимизации неупорядоченных систем.

При описании оптимизации распределения атомов, основанной на двух принципах, используемой для упаковки наноразмерных частиц, также были использованы топологические характеристики.

Рассмотрим первый принцип плотной упаковки: контактирующие между собой и центральным атомом одиночные атомы стремятся занять наименьший объем в результате действия сил притяжения в соответствии с квантовомеханической совместимостью и перекрыванием атомных орбиталей. Таким образом, атомы стремятся максимально заполнить свободный объем с наибольшей плотностью упаковки. При этом, возрастает координационное число, а это повышает устойчивость системы.

Второй принцип плотной упаковки: силы бокового кулоновского отталкивания заставляют контактирующие атомы размещаться в пространстве равномерно, в том числе и относительно центрального атома, на одинаковом расстоянии друг от друга.

Компенсация в случае снижения плотности упаковки атомов в кластерных образованиях происходит за счет увеличения прочностных связей между ними. Когда имеет место наибольшая плотность упаковки наночастиц связь с центральным атомом уменьшается за счет кулоновской однородности распределения, а координационное число уменьшается [43].

Соотношение размера пустот и размера частиц, которые максимально плотно заполняют эти пустоты, позволяет задать соответствующий размерный фактор, при котором в поверхностных слоях и в нанодисперсных агрегациях (атомы или микродисперсные частицы) плотность их упаковки будет одинакова [43].

Вязущее как дисперсная система меняет свое топологическое состояние при измельчении. Поверхностный электростатический заряд возрастает по мере уменьшения частиц при измельчении. При этом увеличиваются силы отталкивания между частицами, а электростатический заряд на поверхности имеет сферическую форму. Твердая дисперсная фаза становится все более рыхлой. Насыпная плотность и плотность упаковки частиц при этом уменьшаются.

Частицы объединяются в агрегации различного размера, имеющие сферическую форму. Средняя плотность упаковки частиц в дисперсной системе становится равной первой критической ($\eta_{1c} \approx 0,2549$).

Энергетические затраты при дальнейшем измельчении направлены на разрушение крупных частиц и агрегаций.

Математический аппарат структурной топологии позволяет установить топологическое состояние вязущих систем, получаемых измельчением, вплоть до нанометрового размера его частиц [44].

При разработке новых материалов, в том числе композиционных, состоящих из твердой и жидкой фазы, возникает необходимость создания наиболее плотной упаковки твердых частиц в заданном объеме.

Увеличение прочности композита, возможно в случае получения композиционного материала с максимально плотной упаковкой твердых частиц. Уменьшение количества связующего в композите приводит к повышению его прочности.

Распространенным подходом к исследованию дисперсных материалов является математическое моделирование их структуры с помощью системы

твердых сфер [39, 40, 45]. Случай монодисперсной упаковки подробно изучен как теоретически, так и экспериментально.

Рассматривая случайную упаковку твердых сфер, как произвольное размещение микрофрагментов с регулярной укладкой в них сфер, можно получить наибольшие средние величины плотности упаковки и их координационные числа Z , как совокупность числа сфер ближайшего окружения центральной сферы приведена для вышеупомянутых упаковок [39]. Известные плотные регулярные укладки шаров в трехмерном пространстве (см. рисунок 1.3) образуют пять упаковок с частотой их повторения при различных способах укладки.

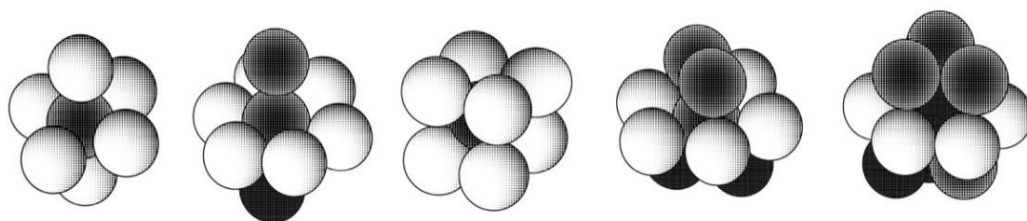


Рисунок 1.3 – Координационные элементы структуры регулярных упаковок шаров: 1 – простая (рядовая) кубическая ($\eta = 0,5236 - 3$, где $Z = 6$); 2 – моногексальная (моношахматная) ($\eta = 0,6046-3$, где $Z = 8$); 3 – объемно-центрированная ($\eta = 0,6802 - 1$, где $Z = 8$); 4 – дигексагональная ($\eta = 0,6981 - 2$, где $Z = 10$); 5 – наиплотнейшие укладки (тригексагональная и гранецентрированная) ($\eta = 0,7405 - 3$, где $Z = 12$) [39]

Определенный порядок распределения в общем объеме обуславливает максимальную плотность упаковки сферических частиц – Φ (доля объема, занятого сферами) в том случае, когда сферические частицы заполняют объем, размеры которого значительно превышают радиус самих частиц.

Максимальная плотность упаковки монодисперсной системы равна $\Phi_c = \pi/\sqrt{18} \approx 0.74$. Она достигается при расположении центров сфер при простой кубической (рисунок 2, б) или плотной гексагональной укладке (рисунок 1.4, г).

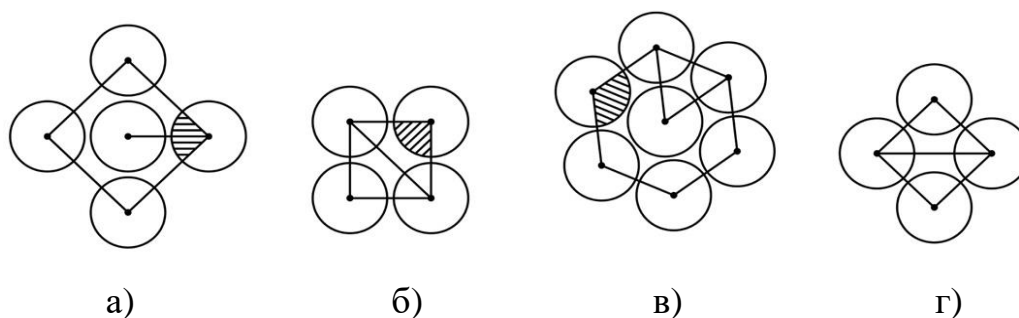


Рисунок 1.4 – Покрывание кругами в двухмерном пространстве: многоугольники (а, б) и элементарные ячейки (в, г) при кубической или гексагональной (в, г) укладке [39]

Результаты многочисленных натуральных и аналитических экспериментов показывают, что плотность не превышает значения $\Phi_a \approx 0.64$ в случае аморфной, то есть не упорядоченной упаковки [45].

По мнению авторов [45], при определенным образом заданных соотношениях диаметров групп частиц возможно получение плотноупакованной полидисперсной системы.

Модель идеального заполнения с гексагональной упаковкой имеет соотношение диаметров сфер 0,1547 [45].

Формирование обеспечивается применением частиц, соотношение между диаметрами которых не менее $1/8$, позволяет получить дисперсные системы с плотной упаковкой [46].

Для практической реализации была использована модель последовательного заполнения объема сферами, позволяющая получить термодинамически устойчивую упаковку полидисперсных сферических частиц.

Промежутки между сферами радиуса $r_0 = r_{\max}$, предварительно плотно уложенными в определенный объем, заполняем сферами радиуса $r_1 < r_0$ таким образом, чтобы пустоты между сферами r_0 были заполнены несколькими частицами r_1 .

Таким образом достигается большая термодинамическая устойчивость создаваемой упаковки по сравнению с апполониевой (самоподобной). Затем более мелкие пустоты аналогично заполняются сферами $r_2 < r_1$. действие повторяют пока размер сфер не достигнет радиуса r_{\min} .

Фракционный состав полидисперсной смеси определяется по результатам моделирования последовательной укладки сфер разных радиусов в заданный объем, обеспечивающий наибольшую плотность упаковки.

Авторами доказано, что в целом предложенный подход к определению зернового состава правомерен. Предложенная модель гарантирует высокое соответствие расчетных и рекомендованных полидисперсных составов.

Высокая плотность упаковки зерен заполнителя дает возможность уменьшить расход вяжущего в композиционном материале. Разработанная модель может быть использована и для заполнителя с прерывистым зерновым составом. Апробация предложенных методик была проведена авторами при разработке оптимальных составов заполнителя для асфальтобетонных и цементобетонных смесей [46,47].

Используемые математические модели рассматривают «идеальную» систему, в которой частицы вяжущего имеют форму шара без учета реальной формы частиц.

Используемый коэффициент формы зерна K_f (отношение площади поверхности шара $\Phi_{\text{шар}}$ к площади поверхности реального зерна Φ_z равного объема) позволяет учитывать отклонение от шаровидной формы.

Коэффициент формы шара равен единице. Количество фракции наименьшего размера в зерновом составе тем выше, чем сильнее форма зерен отличается от идеальной сферической формы [48].

Профессор С.П. Сивков [49] рассматривает два способа снижения пустотности. Либо применение минерального порошка полифракционного гранулометрического состава, либо использование бифракционного состава, в котором значительное количество тонкодисперсных частиц заполняет пустоты между однородными частицами большего размера. Зерновой состав цементов для частиц размером более 5 мкм описывается уравнением Розена–Раммлера–Шперлинга–Боннета [49]:

$$G(r) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{r}{r_0}\right)^n\right], \quad (1.1)$$

где r_0 – характеристический размер зерна цемента,
 n – коэффициент равномерности зернового состава.

Для моделирования многокомпонентных смесей применяются современные алгоритмы 3D-моделирования (DEM, алгоритм перекатывающихся частиц «Drop and Roll», твердотельное моделирование), основанные на уравнениях Эйлера и Ньютона, позволяющие описывать физику поведения зернистых сред (плотные упаковки под действием гравитационных сил, капиллярное структурообразование, раздвижку зерен и др.) [50].

Таким образом, рассмотрение основных фундаментальных характеристик упорядоченных кристаллических и неупорядоченных систем в виде зернистых и дисперсных материалов заключается в нахождении плотности упаковки элементов и координационного числа, что является необходимым для определения физических, механических, реологических и др. свойств строительных материалов. Данный подход будет использован в дальнейших исследованиях по созданию плотной упаковки полидисперсного вяжущего.

1.3 Использование модификаторов для повышения качества структуры и свойств тяжелого бетона

Использование минеральных модификаторов для повышения качества структуры и свойств тяжелого бетона

Перспективным направлением управления свойствами бетонных и растворных смесей и строительными свойствами бетонов, а также снижения материальных и энергетических затрат является применение в их составе различных видов добавок, зачастую называемых в научной литературе модификаторами структуры и свойств цементных систем.

Добавки в бетонах и растворах применяют в необходимой дозировке, которая позволяет получить основной, нормируемый стандартом, технологический и/или технический эффект без снижения или с допустимым уровнем снижения других показателей качества смесей, бетонов, растворов [51].

Различают химические и минеральные добавки.

Химические добавки вводятся в цементные системы в небольшой дозировке (0,02...2% массы цемента), они оказывают значимое влияние как на гидратационные процессы клинкерных минералов, так и на структурообразование цементного камня, позволяя изменять свойства затвердевших растворов и бетонов в требуемом направлении.

Минеральные: дисперсные неорганические добавки природного, техногенного или искусственного происхождения, вводят в бетонные и растворные смеси в количестве 5...20% и более. Их применяют для снижения расхода цемента, экономии заполнителей, получения высокоплотного бетона при низких расходах вяжущего, повышения его стойкости, а также с целью утилизации отходов промышленности.

Необходимо отметить, что в последние годы технология бетонов получает также развитие в формате развиваемой нанотехнологической парадигмы, предусматривающей использование в их составе высокодисперсных частиц и волокон нанометрового размера, предполагающей целенаправленное управление процессами их структурообразования на ультрамикро- и наномасштабных уровнях строения твердой фазы и порового пространства и обеспечивающей принципиальное изменение кинетики эволюционного маршрута формирования продуктов новых гидратных фаз значимо более высокого качества в условиях с различными параметрами производства. Добавки нанометрового уровня – это нанообъекты (волокна, фуллерены и др.), линейный размер которых хотя бы в одном измерении имеет величину, находящуюся в интервале 1...200 нм, и оказывающие определяющее влияние на основные свойства и характеристики композиционных материалов [52].

Очевидно, что актуальной проблемой в этом направлении является развитие теоретических, поисково-прикладных и экспериментальных исследований, обеспечивающих научное обоснование выбора вида, параметров и условий применения нанодобавок в качестве определяющих в общей системе факторов управления процессами структурообразования цементных систем высокого

качества и долговечности.

В технологии бетонов принята развитая классификация добавок. Добавки можно классифицировать по оказываемому воздействию на свойства бетонной смеси и готового бетона – можно выделить добавки, регулирующие свойства бетонных и растворных смесей (вязкопластичная стадия существования); регулирующие свойства бетонов и растворов (твёрдая стадия существования); придающие бетонам и растворам специальные свойства (указанные свойства могут придаваться как на стадии вязкопластичной смеси, так и для твёрдых бетонов и растворов. Органические добавки классифицируют по основному полимеру или комплексу полимеров, оказывающему действие, например, поликарбоксилатные, меламинсульфонатные, поливинилакрилатные и т.п. Минеральные добавки классифицируют по составу вещества и возможности участия в процессах структурообразования цементного камня, Активные минеральные добавки могут вступать в реакции с продуктами гидратации цемента, инертные минеральные (называемые также микронаполнителями) не могут [51].

1.3.1 Добавки, регулирующие свойства бетонных смесей и их применение в цементных системах

По величине пластифицирующе-водоредуцирующего эффекта добавки разделяют на несколько видов:

- пластифицирующие добавки, повышающие подвижность бетонных смесей от марки П1 до марок П2–П4, а подвижность от Пк1 до Пк2 – Пк3.
- суперпластифицирующие добавки, повышающие подвижность бетонных смесей от марки П1 до П5, а подвижность растворных смесей от Пк1 до Пк4 соответственно;
- гиперпластифицирующие добавки, позволяющие получить растекающиеся бетонные смеси без расслоения оных, вплоть до получения самоуплотняющихся бетонов.

Повышение подвижности бетонных и растворных смесей для суперпластифицирующих и пластифицирующих добавок не должно сопровождаться снижением прочности бетона и раствора более чем на 5%. При применении добавок могут возникать побочные эффекты.

Добавки относят к соответствующей группе в зависимости от того, какой эффект от применения используется, пластифицирующий или водоредуцирующий.

В настоящее время особое значение приобретают исследования, целью которых является качественное изменение представлений о материале, который был, остается и, очевидно, останется в будущем наиболее массовым и значимым в строительстве, включая строительство конструкций и сооружений гидромелиоративного назначения [53-54].

Наиболее важными достижениями в области бетоноведения являются исследования, позволяющие расширить понятия о микро-, субмикро- и наноуровне процессов структурообразования, и обеспечивающие значимое повышение физико-механических характеристик, и прежде всего прочности и долговечности. Получены, разработаны и сформулированы научно-обоснованные закономерности процессов гидратации минералов цементного клинкера и управления структурообразованием цементного камня и бетона [55-56]. На основе этих положений разработаны эффективные методы защиты бетона и железобетона от коррозии и способы повышения его долговечности.

Модификации бетонов химическими добавками – основное направление развития технологии бетона, что подтверждено научными исследованиями и внедрено в практику работы реальных предприятий. Известны комплексные модификаторы различного функционального применения, как, например: С-3, Дофен, МФ-АР (суперпластификаторы), НТФ (замедлитель схватывания), ГКЖ-10, ГКЖ-11, НЧК, КЧНР (воздухововлекающие добавки), КЭ30-04, ПГЭН, ПГН (микрогазообразующие) или ФЭС-50 и ФЭС-66 (гидрофобизирующие).

Успешное применение комплексных модификаторов подтверждает их направленное воздействие на реотехнологические свойства бетонных и

растворных смесей, что связано с влиянием органических соединений на свойства адсорбционных слоев.

Несмотря на то, что первый патент на разжижитель (суперпластификатор) растворных смесей был получен еще в 1935 году, широкое применение подобных добавок началось в конце 50-х годов, когда промышленность развитых стран восстановилась после мировой войны.

Такие страны, как Япония и Германия приступили к производству суперпластификаторов в качестве товарного продукта. В России использование суперпластификаторов в промышленных масштабах начато лишь в конце 70-х годов.

Наиболее значимыми изобретениями для развития науки о бетоне можно считать разработку добавок-суперпластификаторов (СП) и микрокремнезема (МК), в том числе использование высокодисперсных кремнеземсодержащих материалов техногенного происхождения.

Комплексные добавки-модификаторы на основе различных органических и минеральных веществ не только регулируют реотехнологические свойства растворных и бетонных смесей в широких пределах, но и позволяют оптимизировать микроструктуру цементного камня с получением бетона высоких строительно-технических свойств [57-60].

Разработанное комплексное химико-минеральное модифицирование структуры на различных иерархических уровнях и свойств бетона с использованием добавок с уникальными свойствами определило появление термина: это бетоны с прочностью от 60 до 80 МПа (высокой) и свыше 100 МПа (сверхвысокой). Такие бетоны имеют низкую проницаемость, высокую стойкость против коррозии и, следовательно, высокую долговечность.

Термин High Performance Concrete (HPC) был предложен и введен в практику в 1986 году канадским ученым П.К. Айчиным. Айчин П.К. и его последователи предлагали развивать технологию получения многокомпонентных технологичных бетонов высокой плотности, прочности и долговечности, с высокими эксплуатационными характеристиками [61, 62].

Современный высокопрочный долговечный бетон с высокими технологическими показателями безопасен в отношении окружающей среды, имеет высокие экономические показатели из-за малой энергоемкости и широкой сырьевой базы с возможным использованием местных материалов (в т.ч. техногенные отходы) [63, 64].

Классификация высокопрочных бетонов ведется по назначению:

- High Performance Concrete (высокопрочные);
- Ultra High Performance Concrete (ультра высокопрочные) [65, 66];
- Self-Compacting Concrete- SCC (самоуплотняющиеся бетоны) [67, 68];
- высоко коррозионностойкие бетоны.

Reactive Powder Concrete (RPC) — это порошково-активированные бетоны, имеющие оптимизацию дисперсно-гранулометрического состава на различных структурных уровнях [69, 70].

В отечественной практике основоположниками создания высокопрочных бетонов в начале 70-х годов прошлого столетия были следующие ученые: Ахвердов М.Н., Михайлов Н.В., Михайлов В.В., Баженов Ю.М. [71, 72]. Состав бетона того периода был представлен, как правило, четырьмя компонентами. Такие бетоны имели различные виды микродефектов структуры, связанных, в первую очередь, с недоуплотнением. Для получения высокопрочного бетона марок М600–М700 использовались жесткие бетонные смеси с низким водоцементным отношением на цементах высокого качества. Высокая плотность и прочность достигались интенсивным виброуплотнением (например, с пригрузом или с применением повторного вибрирования).

В начале 80-х годов XX века использование суперпластификаторов (СП) на нафталин- и меламинсульфонатной основе позволило в промышленных масштабах получать бетоны с прочностью до 100 МПа.

К концу XX века разработки новых СП на полигликолиевой, поликарбоксилатной и полиакрилатной (PCE) основе сделали возможным получение бетонов с прочностью 150–200 МПа [73, 74].

Механизм действия СП и PCE на современном уровне развития науки о

бетоне представляется следующим. Молекулы суперпластификатора (или РСЕ) адсорбируются на частицах цемента и гидратных фазах новообразований минералов клинкера с изменением ионно-электростатического потенциала, а также стерическим эффектом для РСЕ.

Следует отметить, что водоредуцирующее действие СП и РСЕ в растворных и бетонных смесях связано с дисперсной фазой, то есть только цементно-водной дисперсий. То есть при снижении расхода цемента уменьшается водоредуцирующее действие СП и РСЕ в силу снижения содержания водно-дисперсной фазы. Поэтому многие исследования показывают, что высокий уровень водоредуцирования бетонной смеси обеспечивается высоким содержанием компонентов дисперсного размерного уровня (цемента, минеральных добавок).

Эффективность действия СП и РСЕ повышается при введении в состав растворной или бетонной смеси мелкодисперсных частиц, в том числе минеральных модификаторов с удельной поверхностью равной $4500 \text{ см}^2/\text{г}$ и выше [75-78].

Производство высокопрочных высококачественных бетонов является важной задачей современного строительного производства, а их применение позволит реализовать уникальные архитектурные проекты и создавать долговечные здания и сооружения.

К сожалению, к настоящему времени в России проблема применения долговечных высокопрочных и сверх высокопрочных бетонов нового поколения, стойких к различным видам агрессивного воздействия окружающей среды, в т. ч. Комплексного, заключается в недостаточно быстром освоении технологии производства таких видов бетона и методов расчета несущих конструкций с их использованием. В связи с этим, представляется особенно актуальным широкое применение таких видов бетонов при изготовлении всевозможных конструкционных и декоративных архитектурно-отделочных изделий, а также, например, долговечных гидротехнических сооружений, в том числе для мелиоративного строительства, на примере которых можно наблюдать и

исследовать в эксплуатационных условиях их уникальные возможности.

Постоянно растущий ассортимент предлагаемых добавок-суперпластификаторов необходимо было классифицировать по существенным признакам, так, например, по химическому составу выделяют на четыре основные группы:

1) Сульфонированные меламиноформальдегидные смолы (МСФ) и комплексные добавки на их основе. Такие добавки производят в разных странах, так, например, в Федеративной республике Германии (Мелмент Л10, Мелмент F), в Великобритании (Конпласт М1, Силопласт Супер), Швеции (Фриодур), Российской Федерации (10-03, МФ-АР, Перамин ФП, Перамин ФС).

2) Продукты совместной конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида (НСФ) и комплексные добавки на их основе. Перечислим некоторые продукты производства иностранных производителей: Майти (Япония), Rheobuild 2000 (ФРГ), Ломар Д (США), Кормикс (Великобритания), Флюоимакс (Италия), В РФ производят такие добавки, как С-3, Дофен ДФ и другие.

3) Очищенные или модифицированные лигносульфонаты (ЛСТМ) и комплексные добавки на их основе. На основе лигносульфонатов в ФРГ производят такие добавки, как ФН Ликвидат ВС и Pozzolith 90, во Франции – Хрис флюид, в Японии – Позолиш ЗООН. В России выпускается целый ряд суперпластификаторов: ХДСК-1, ХДСК-3, ЛСТМ-2, НИЛ-20, ЛСТМ-2, Лигнопан Б-1 и др.

4) Прочие суперпластификаторы, например, полигидроксильные высшие карбоновые кислоты. К этой группе можно отнести такие добавки, как Пластимент БВ-40 (производства Великобритании), Зика-Вискорит-5, Зика-Вискорит-5-600/-5-800 (Швейцария), Glenium® 51, Glenium® 115, Glenium®430 из ФРГ, а также водорастворимые олигомеры акрилатного ряда, алкилаурилсульфонаты, сульфированные полиоксикетоны, олигомеры эфиров сульфоновой кислоты.

Первые продукты РСЕ представляли собой сополимеры метакрилата натрия и макрономеров метоксиполиэтиленгликоля метакрилата (так называемый тип

MPEG), но в настоящее время разработано и освоено много других продуктов PCE, включая аллиловый эфир (APEG), метеллиловый эфир (HPEG) и изопрениловый эфир (IPEG или TPEG) [79, 80]. PCE пластификаторы делятся на: обыкновенные и специальные.

Структура PCE может быть представлена следующим образом: анионная цепь полиметакрилата с прикрепленными адсорбирующими карбоксильными группами и боковыми эфирными неадсорбирующими цепями на основе либо полиэтиленоскида (PEO), либо полиэтиленгликоля (PEG). Следует отметить, что существует возможность модифицирования структуры PCE в зависимости от того, какие требования установлены к бетонной смеси, а также в соответствии с совместимостью материалов, применяемых для бетонной смеси.

На эффективность действия суперпластификаторов в растворных и бетонных смесях влияет множество факторов: структура суперпластификатора, в частности, функциональность активных групп, их взаимное расположение, связанное с длиной (молекулярной массой) и формой цепей.

Применяемые поверхностно-активные вещества могут быть природные или синтетические. В зависимости от длины молекулярной цепи они могут быть короткоцепочечные или длинноцепочечные. Особо значимым фактором является последовательность взаиморасположения гидрофильных и гидрофобных групп. [81, 82].

Наибольший пластифицирующий эффект достигается в том случае, когда в структуре добавки чередуются гидрофильные и гидрофобные группы.

Анализ структуры молекул наиболее распространенных суперпластификаторов показывает, что они имеют вполне определенное соотношение гидрофильных и гидрофобных групп, которое позволяет эффективно регулировать коллоидно-химические процессы при гидратации цементов.

Анализ структуры суперпластификаторов, состоящих из гидрофобного углеводородного кольца и активной гидрофильной группы, позволяет ожидать повышение пластифицирующего эффекта гидрофильных функциональных групп

на единицу структурного элемента макромолекулы и одновременном уменьшении размеров гидрофобной группы молекулы.

Так, например, суперпластификатор СП 40-03, который получают совместной конденсацией сульфокислот с формальдегидом, имеет две анионноактивных сульфогруппы в основном структурном звене олигомера [83].

Необходимость создания суперпластификаторов определенного строения предопределяет основные технологические способы их получения. Чаще всего используется синтез необходимых олигомеров (полимеров) из мономеров в сочетании с сульфированием.

В составе суперпластификатора сульфогруппа выполняет роль анионноактивной функциональной группы. В силу того, что сульфокислоты органических соединений хорошо растворяются в воде, она придает олигомерным молекулам водорастворимость. Сульфогруппа обладает выраженными гидрофильными свойствами и имеет высокое значение группового числа ГЛБ (по Дэвису). В разбавленных водных растворах сульфогруппы повышают ионную силу жидкой фазы, так как они сильно диссоциированы.

Вторым направлением для создания суперпластификаторов является модификация исходных полимерных продуктов химическими и физико-химическими методами. К наиболее эффективным продуктам такого вида относятся технические лигносульфонаты, являющиеся отходом комплексной переработки сульфатных щелоков при производстве сульфитной целлюлозы.

Исследованию механизмов действия различного рода пластификаторов и суперпластификаторов посвящено значительное число работ [81-83]. В этих работах приводятся следующие механизмы их действия на синтез структуры, формирование свойств и процессы, протекающие в цементных системах. Например, одна из теорий объясняет разжижающее действие добавки появлением при ее введении мельчайших воздушных пузырьков, которые играют роль псевдогидродинамической «смазки». Существует теория стерического отталкивания в диффузной зоне при наличии в добавке привитых боковых цепей, которая может быть применима только для СП IV группы, в частности,

поликарбоксилатов РСЕ.

Основные минералы клинкера портландцемента C_3S и C_2S в воде имеют отрицательный дзета-потенциал (ξ -потенциал), а C_3A и C_4AF – положительный. Применение суперпластификаторов усиливает потенциал поверхности цементных фаз. Принято считать, что использование поверхностно-активных веществ увеличивает расстояние, на котором начинают проявляться силы отталкивания. Например, с 10 нм для обычной чистой воды до 100 нм при наличии в ее составе добавок ПАВ, а в точке контакта силы отталкивания составляют $(0,16-0,44)10^{-9}$ Н.

Так, например, известно, что адсорбция ЛСТ, СНФ и СМФ не избирательна по отношению к цементным фазам, тогда как суперпластификаторы на основе поликарбоксилатов преимущественно адсорбируются на C_3A и C_4AF . Трехкальциевый алюминат – это наиболее активный минерал и оказывает серьезное влияние на свойства цементного теста сразу после затворения цемента водой.

Поэтому можно предположить, что если полимер адсорбируется преимущественно поверхностью минералов C_3A и C_4AF и продуктов их гидратации, то его эффективность значимо выше, чем других видов полимерных веществ.

Подтверждением означенного положения следует считать и то обстоятельство что эквивалентное значение водоредуцирующего эффекта достигается при меньшем количестве поликарбоксилатов по сравнению с СНФ и СМФ. То есть, поликарбоксилаты в меньшей степени адсорбируются на поверхности C_2S и C_3S и их гидратных фаз, оказывая меньшее влияние на механизм и степень их гидратации.

Сополимеры различной длины и молекулярной массы, образующие длинные боковые цепи в структуре добавки, дают, так называемый, стерический эффект, – объемный барьер для коагуляции частиц цемента и гидратных фаз минералов. Электростатические силы отталкивания частиц, линейно связанные с вязкостью и текучестью цементного теста, значительно уступают по величине вышеназванному стерическому эффекту.

Многие исследования, в том числе Б.В. Гусева [84], содержат сведения о том, что стерический эффект взаимодействия имеет место даже для пластификаторов с небольшой молекулярной массой, а для таких высокомолекулярных соединений, как лигносульфонаты и суперпластификаторы на основе меламинаформальдегида доля в суммарных силах отталкивания приближается к 50%.

Однако, несмотря на это, усиления пластифицирующего действия на бетонные смеси при использовании добавок меламинаминового типа не наблюдается. Известно, что для алюминатных мономинеральных фаз каждая фракция добавки оказывает пластифицирующий эффект, соответствующий ее количеству.

При увеличении молекулярной массы добавки имеет место снижение пластифицирующего эффекта для алюминатной фазы в виде трехкальциевого алюмината (C_3A).

Что связано, вероятно, с трудностями поверхностной миграции суперпластификатора с длинными цепями, имеющими высокую энергию связи с поверхностью частиц C_3A за счет адсорбционных и превалирующих хемосорбционных сил, к вновь образующимся гидратным фазам.

При определении состава добавки для применения в смесях на основе портландцемента следует учитывать, помимо наличия высокомолекулярных составляющих и содержания C_3A , такие факторы, как содержание и скорость растворения гипсового компонента, содержания свободных щелочей.

Состав и свойства применяемого портландцемента, а также свойства самого пластификатора определяют не только величину пластифицирующего эффекта, но и сохранность его во времени.

Таким образом, могут быть случаи несовместимости добавок с цементами, когда пластифицирующий эффект добавки не проявляется.

Несовместимость может быть обусловлена тем, что в течение начального периода гидратации алюминатная фаза образует плотный слой гидратных фаз новообразований на частицах цемента, толщина которого может достигать одного микрона. В зависимости от скорости образования этtringита и кинетики

адсорбции суперпластификатора можно наблюдать два различных варианта:

- толщина адсорбционного слоя СП превышает высоту слоя новообразований гидратных фаз. В этом случае добавка является высокоэффективной;
- толщина адсорбционного слоя суперпластификатора ниже высоты слоя образовавшихся гидратных фаз – действие пластификатора прекращается.

Таким же образом можно объяснить снижение эффекта действия добавок во времени. Увеличивающийся объем гидратных фаз в процессе гидратации минералов цемента «блокирует» пластификатор, что приводит к прекращению пластифицирующего действия в течение 2-3 ч после введения в растворную или бетонную смесь.

Для суперпластификаторов первых трех групп наиболее аргументированной является адсорбционная теория. Предполагается, что адсорбционный слой, который образуют полярные молекулы пластифицирующих добавок на поверхности частиц цемента, вытесняет молекулы воды и они изменяют электрокинетический потенциал (ξ -потенциал).

Увеличение подвижности растворных и бетонных смеси связано, таким образом, с увеличением сил отталкивания при суммарном действии всех вышеперечисленных факторов.

При введении поверхностно-активных веществ в цементную систему меняется скорость растворения минералов клинкера, так как изменяется степень пресыщения жидкой фазы, условия смачивания поверхности твердых частиц и, соответственно, величина капиллярных сил.

Например, воздухововлечение увеличивает пластифицирующий эффект, но при этом могут быть ухудшены показатели прочности, проницаемости и долговечности цементного камня.

Механизм действия суперпластификаторов (высокомолекулярные анионактивные ПАВ) может быть представлен следующим образом (несколькими процессами): на поверхности твердых частиц адсорбируются молекулы олигомеров; при этом идет изменение электрокинетического потенциала их поверхности; изменяется проницаемость образующейся адсорбционной оболочки

и двойного электрического слоя диполями воды и продуктами растворения твердой фазы; изменение толщины граничного слоя водной пленки, находящейся у поверхности частиц твердого тела и связанной с ней адсорбционными силами.

Адсорбции молекул НСФ на поверхности цементных частиц приводит к изменению ξ -потенциала поверхности от -10 до $-(20-35)$ мВ (по некоторым источникам от $-(15-20)$ до $-(40-45)$ мВ). Поверхность получает отрицательный заряд, то есть при сближении одноименно заряженных частиц возникают силы электростатического отталкивания, что по сути дела и является условием пластификации. Добавки СП являются в этих условиях стабилизаторами дисперсных систем.

При образовании на поверхности частиц монослоя поверхностно-активных веществ снижаются прочность и энергия связи коагуляционных контактов в образовавшейся при взаимодействии вяжущего с водой структуре.

При адсорбции ПАВ происходит раздвижка частиц, как минимум на толщину двух молекулярных слоев, при этом экранируются наиболее энергетически активные участки поверхности частиц.

Толщина адсорбционного слоя суперпластификатора может быть 5-15 нм. Введение СП на ранних стадиях взаимодействия цемента с водой дезагрегирует цементные агрегаты и затрудняет последующую коагуляцию мелких и средних по размеру частиц, в т.ч. образующихся гидратных фаз вследствие молекулярного отбора.

Не агрегированные частицы имеют большую удельную поверхность, увеличивается поверхность реакции и, соответственно, ускоряется гидратация минералов клинкера. Идет структурирование системы, так как образуются однотипные, однородные по строению и составу и упорядоченные зародыши гидратных фаз вследствие молекулярного отбора их в менее стесненных условиях: зародыши в виде кластеров частиц гидратных фаз.

Степень электролитической диссоциации СП для водных растворов суперпластификаторов СНФ и СМФ при стандартных дозировках составляет 30-70%.

Прочная сорбция на поверхности цементных частиц обеспечивается значительным количеством сульфогрупп в молекулах суперпластификатора. Помимо хемосорбции имеет место и физическая адсорбция СП.

Прочная хемосорбционная связь с минералами цемента препятствует миграции добавки к поверхности гидратных фаз дисперсностью на порядок, превышающей удельную поверхность портландцемента. Для повышения действия и экономного расходования пластифицирующих-водоредуцирующих добавок их необходимо вводить в бетоносмеситель за 10-15 с до окончания приготовления бетонной смеси.

Структура суперпластификатора обуславливает проницаемость образующейся адсорбционной оболочки. При адсорбции молекул СП на активных центрах твердой фазы частиц цемента и гидратных фаз гидрофильная сульфогруппа постоянно находится в окружении молекул воды, в так называемой, «гидратной шубе» [84].

Замедление процессов гидратации и формирования структуры цементного камня наблюдается в том случае, когда поверхность гидрофобных групп в молекулах СП по площади больше площади гидрофильных, так как в этом случае создается дополнительный барьер для молекул воды при их миграции к поверхности частиц цемента.

Толщина адсорбционной воды (воды граничного слоя, структура которой близка к структуре кристаллической фазы) составляет от 1 до 10 нм (то есть примерно от 4 до 40 молекулярных слоев).

Длина молекул СП составляет несколько нанометров, то есть эти величины соизмеримы.

Способность молекул СП к дезагрегированию частиц твердой фазы и вытеснению воды с их поверхности значительно влияет на реологические свойства.

При применении поликарбоксилатных суперпластификаторов (IV группа или в своем большинстве РСЕ) в качестве поверхностно активных веществ – суперпластифицирующих/суперводоредуцирующих добавок – модификаторов

цементных систем, включающих в себя в основном бетонные смеси для высокопрочных бетонов и самоуплотняющиеся бетонные смеси (SCC) [85].

Адсорбирующее действие – диспергирующая способность РСЕ обусловлена адсорбцией, как правило, физической, на положительно заряженных участках частиц цемента и главным образом на алюминатных и ферритовых фазах (C_3A и C_4AF) и их начальных продуктах гидратации – этtringит, моносulьфоалюминат [12], что снижает их оптимальные дозировки (0,15-0,6 % раствора промышленной концентрации). Отрицательно заряженные карбоксильные COO^- группы связываются с ионами Ca^{2+} , которые впоследствии встраиваются в состав образующихся гидратных фаз [81].

Необходимо отметить, что поликарбоксилаты обладают высоким воздухововлекающим эффектом. При промышленном производстве добавок для снижения воздухововлечения вводят специальные компоненты, так называемые, пеногасители. Что следует учитывать, при применении воздухововлекающих добавок с целью повышения морозостойкости бетона.

Эффективно в составе комплекса с поликарбоксилатами могут быть использованы добавки, обеспечивающие образование замкнутых мелкодисперсных пор в структуре цементного камня (например, лигносульфонаты, СНВ, СДО и др.). Оптимальная дозировка должна быть минимальной (например, для лигносульфонатов не более 0,1% массы цемента).

При проектировании состава бетона с использованием добавок на основе поликарбоксилатов необходимо увеличение доли песка в смеси заполнителей. Кроме того, имеют место особые требования к гранулометрическому составу заполнителей. Воздух в бетон вовлекается растворной составляющей. Предпочтительно наличие зерен песка размером 0,2...1 мм. Объем вовлеченного воздуха снижается при содержании в песке зерен более мелких, чем 0,2 мм. Преимущественно используется кварцевый песок, вовлекающий большее количество воздуха. Для получения плотной структуры бетона с минимальным содержанием воздуха, следует применять песок полифракционного состава. Повышение содержания цемента снижает объем вовлеченного воздуха [86].

Использование суперпластифицирующих/суперводоредуцирующих добавок-модификаторов оказывает влияние на свойства бетонной смеси и отвердевшего бетона. При этом эффективность применения суперпластификаторов поликарбоксилатного типа (РСЕ) значимо более высокая, чем других видов пластификаторов, заключающаяся в возможности получения наиболее высокопрочных долговечных бетонов, в т.ч. для мелиоративного строительства.

1.3.2 Опыт применения добавок-полимеров в цементные бетоны

В связи с повышением требований к качеству бетона и железобетона, обозначенному на современном этапе развития строительного комплекса, значимо возрос интерес к полимерным материалам. Полимеры могут выполнять роль вяжущего вещества, полимеры и материалы на их основе используют в качестве добавок в растворную или бетонную смесь, а также для специальной пропитки готовых бетонных и железобетонных изделий с целью значимого повышения их прочности и долговечности.

Необходимо отметить, что технология производства изделий из цементно-полимерных бетонов практически не отличается от традиционной технологии. Минеральное вяжущее вещество, входящее в состав полимерных бетонов, взаимодействуя с водой, образует цементный камень, связывающий зерна заполнителей в единый материал конгломератного типа строения, а полимер по мере удаления влаги из структуры бетона образует пленку на поверхности пор, капилляров, частиц цемента и зерен заполнителей. Цементно-полимерный бетон приобретает повышенные физико-механические свойства по сравнению с обычным бетоном, однако, в ряде случаев такой бетон может характеризоваться снижением прочностных показателей при их эксплуатации в водной среде.

В цементные бетоны добавляют на практике добавки-полимеры: водорастворимые смолы, поливинилацетат (ПВА) и латексы и т.п.

В частности, наиболее применимыми и эффективными являются

эпоксидные смолы, требующие обязательного применения специальных отвердителей и катализаторов. Эпоксидные смолы вследствие высокой эффективности получают широкое применение не только в составе бетонов, но и в строительных растворах [87-91].

Значительно чаще полимерные компоненты вводятся в составы бетонов в небольших дозировках в качестве влияющих на структурообразование добавок.

В работе предлагается использовать в качестве такой добавки поливинилпирролидон, который при малом содержании оказывает значимое влияние на реологические свойства.

Поливинилпирролидон (ПВП) – синтетический полимер-гамма-виниллактам N-аминомасляной кислоты с общей молекулярной формулой C_6H_9NO . Структурная формула условной молекулы ПВП Полидон-А приведена на рисунке 1.5.

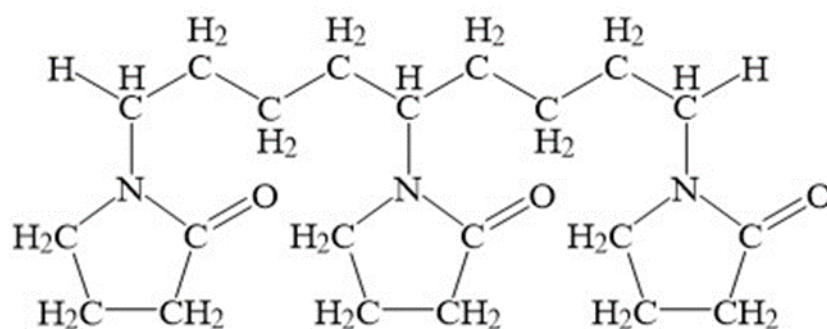


Рисунок 1.5 – Структурная формула молекулы Полидона–А

Молярная масса ПВП составляет 2500...2500000 г/моль; плотность равна 1,2 г/см³; температура плавления в зависимости от структуры полимера находится в диапазоне 150-180 °С. Является хорошим адгезивом, обладает высокими клеящими способностями.

ПВП представляет собой дисперсное порошкообразное вещество белого или желтоватого цвета. Характеризуется высокой гигроскопичностью (до 40% поглощения влаги из воздуха по массе), что может оказывать положительное влияние на активацию клинкерного фонда в затвердевшем бетоне. Хорошо смешивается со спиртами, водосодержащими растворами, хлороформом. Растворяется в воде и полярных растворах, почти не совместим с эфирами.

В производстве строительных материалов ПВП до настоящего времени применялся мало. Тем не менее, он применяется в качестве усиливающего адгезию компонента при производстве полистиролбетонных изделий. За счёт своей способности к комплексообразованию ПВП обеспечивает сцепление с матрицей цементного камня гранул пенополистирола, который в обычных условиях адгезии по отношению к цементному камню не имеет.

Наиболее технологически удобной формой применения ПВП является 10-15% водный раствор полимера марки Полидон-А производства ООО «Оргполимерсинтез» СПб, вязкостью от 3000 до 6000 МПа·с при 25 °С. Оптимальная дозировка данной добавки по рекомендации производителя составляет 0,1% от массы цемента для материалов с плотностью от 250 до 350 кг/м³ и 0,2% от массы цемента для материалов с плотностью от 800 до 1000 кг/м³.

Предполагается, что означенные высокие свойства ПВП определяют проведение исследований с возможностью его применения в производстве бетонных изделий для мелиоративного и гидротехнического строительства с целью значимого повышения их прочности и долговечности. Необходимо отметить, что такие исследования будут выполнены впервые.

1.3.3 Предпосылки использования микрокремнезема для улучшения коррозионной стойкости цементных материалов

Главным средством борьбы с коррозией выщелачивания (I вид коррозии) в цементных системах (вымывание гидроксида кальция) является введение активных минеральных добавок и применение плотной матрицы цементного камня. К таким выводам можно прийти после изучения практического опыта авторов научных работ [92-95] в которых отмечается, что при выщелачивании портландита в количестве 20-30% от общего содержания происходит снижение прочности цементного камня на 35-50% и более. Ключевая особенность рекомендаций в данных работах заключается в применении кремнеземсодержащих добавок, в частности микрокремнезема, который является

побочным продуктом, содержащим более 91% оксида кремния, и образуется в процессе выплавки ферросилиция, где пылевые частицы микрокремнезема размером 10-50 мкм задерживаются на электрофилт্রে [96, 97].

Ключевыми стимулами начала использования промышленных отходов в повторном производстве были необходимость обеспечения безотходного производства, озабоченность загрязнением окружающей среды и необходимость его снижения, а также элементарная экономия расходов на вяжущих веществах при производстве. В 1950 году состоялись первые зарубежные исследования исходных характеристик бетона, получаемых под воздействием эффекта от применения микрокремнезема в его производстве [98]. Отечественные исследования и практические испытания по использованию кремнезема в производстве различных видов бетонов датированы 1980 годом [99-102].

Микрокремнезём представляет собой осаждённые микросферы, состоящие из преимущественно аморфного или стекловидного оксида кремния SiO_2 . В промышленности микрокремнезём получается в виде побочного продукта восстановления кварца двуокисью углерода в электродуговых печах. Основной источник конденсированного микрокремнезёма – металлургическая промышленность, в частности, выплавка углеродистых сталей.

Гранулометрический состав аморфного кремнезема, его высокая удельная поверхность и пуццоланическая активность позволяют микрокремнезему выступать в роли пуццолановой добавки в бетоны. Резюмируя, выделим на основе исследований [97-102] наиболее важные аргументы в пользу аморфного кремнезема как добавки при производстве бетона, несущей в себе пуццолановые свойства. Микрокремнезём:

- увеличивает зону контакта между заполнителем и цементным камнем;
- берет на себя функцию микронаполнителя;
- образует низкоосновные гидросиликаты кальция (CSH) силами вступления в реакцию с гидроксидом кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) и их связывания.

Добавление кремнезема в количестве 2-6% от общей массы в состав бетонной смеси приводит к следующим технологическим изменениям в

получаемом продукте: межзерновое пространство бетона заполняется, пористость капиллярных пор уменьшается, а переходная зона между цементным камнем и заполнителем становится плотной и насыщенной, кристаллы портландита, в свою очередь, уменьшаются [96, 97]. Подобное уплотнение структуры бетона приводит к улучшению его качественных характеристик: бетон становится более водонепроницаемым, а также менее чувствительным к агрессивному воздействию внешней среды.

Ряд отдельных исследований проводились относительно расходования микрокремнезема в диапазоне от 10 до 15% в производстве бетона и получаемых новых характеристик бетонной смеси. Авторы работ [20, 103] отмечают, что в период первой недели у полученного бетона происходит ускоренный процесс гидратации, а также при условиях равномерного твердения и тепловлажностной обработки прочность продукта увеличивается в два раза. Положительные изменения в структуре цементной системы, связанные с переходом элементов системы в каркасные пространственные ячейки, а также с изменением протяженности структурных цепочек цемента, становятся возможными под влиянием микрокремнезема на тиксотропные свойства системы. Гидратообразование с кремнеземсодержащими частицами приводит к самоармированию цементной системы, ее укреплению и образованию пространственной упаковки [103].

Научный интерес также вызывают совместные возможности аморфного кремнезема и суперпластификатора, оказывающие эффект, который улучшает характеристики производимого порошкового бетона [104, 105]. При использовании двух данных элементов в производстве продукт обретает дополнительную прочность до 150 МПа к сжатию, а также становится более водонепроницаемым и стойким к образованию трещин. В работах П.А. Ребиндера [106-108] отмечается, что ПАВ в составе производимого бетона приводит к повышению активности наполнителя. Воздействие со стороны химической энергии на молекулярную и кристаллизационную структуру вяжущего материала приводит к аморфизации элементов, диспергированию зерен наполнителя. В то

же время поверхностно-активное вещество предотвращает агрегацию частиц наполнителя. Поверхностно-активное вещество наделяет поверхность структуры следующими свойствами: оберегает от воздействия внешней среды, поддерживает сохранность активности вещества при хранении [106-108].

В исследовании [109] приводится ряд рекомендаций по совместному использованию в производстве жестких бетонов кремнезема и пластификатора. Отмечается улучшение характеристик прочности, плотности, связанности бетона, уменьшение водоотделения благодаря увеличению доли пуццолановой добавки до 10% от всей массы вяжущих веществ и снижению водопотребности бетона.

Органоминеральные модификаторы, такие как МБ-01 и МБ-С, были выведены исследователями В.Г. Батраковым, С.С. Каприеловым и А.В. Шейнфельдом [98, 100] и позднее применены в строительстве. В рецептуру МБ-01 входят микрокремнезем и С-3 суперпластификатор. Пределы применения в составе цемента модификатора МБ-01 допускают 30% от общей массы. Использование модификатора в пороговом значении улучшает характеристики бетона в части прочности до 20%, а также в части пластичности цементной смеси от 25 до 110%. Наиболее практичным решением по применению в производстве МБ-01 является острая прикладная необходимость бетона, например, в строительстве особо важных объектов, обладающего особыми характеристиками прочности и эластичности. Массовое применение данного модификатора невозможно в связи с его высокой стоимостью и чрезмерным увеличением себестоимости бетона [35].

Устойчивое повышение цен пуццолановой добавки привело к тому, что ее стоимость составляет до 7500 рублей за тонну, что существенно ограничивает диапазон совместного использования кремнезема с суперпластификатором, несмотря на хорошо изученную и общеизвестную положительную реакцию данных элементов в составе бетонных соединений. По этой причине работы Р. Айлера и Г.Д. Чукина [111, 112], исследующие химическую обработку кремнезема и его реакции в различных жидких средах, несут особую практическую ценность. Авторы установили поведение в щелочной среде

аморфного оксида кремния SiO_2 , из которого состоит более 92% кремнезема. Исследование [111] раскрывает подробные процессы растворения кремнезема в щелочных, кислых средах и воде при условии наличия в данных средах необходимого катализатора. Катализатором в щелочах выступает гидроксид-ион, который ослабляет кислородные связи атомов кремния за счет своей способности хемосорбироваться на частицах кремнезема, чем увеличивает координационное число атомов кремния до числа более четырех.

Исследование трудов как зарубежных, так и отечественных ученых [111-116] в области анализа пуццолановых свойств кремнезема, изучения эффекта от совместного применения кремнезема с суперпластификатором, поиска различных способов активации кремнеземсодержащих частиц подтверждают многочисленные выводы о том, что использование в производстве бетона микрокремнезема улучшает качественные характеристики продукции, увеличивает плотность, водонепроницаемость бетона.

Выводы по главе 1

1. Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения является одной из приоритетных задач современной России. Анализ состояния лотковой системы гидромелиоративных сооружений показывает, что каждый четвертый лоток требует восстановления, а проектный срок их эксплуатации составляет 25 лет. Повышение качества бетона для гидромелиоративного строительства с целью значимого повышения его строительно-технических свойств, в том числе эксплуатационной надежности и долговечности является актуальной проблемой современного строительного комплекса.

2. Представляется целесообразным проведение исследований по комплексному модифицированию структуры на микроуровнях путем применения полидисперсных компонентов и комплексного модификатора (суперпластификатор+полимер+микрокремнезем) с целью оптимизации дисперсно-гранулометрического состава с целью повышения концентрации

твердой фазы в каждой единице объёма бетона, а также его плотности, прочности, непроницаемости и долговечности. Низкое водосодержание и рациональные реотехнологические свойства бетонной смеси обеспечиваются при этом применением высокоэффективного суперпластификатора на поликарбоксилатной основе.

3. Трехуровневый дисперсный состав клинкерного компонента, состоящий из грубой, средней и тонкой фракций его частиц, при оптимальном соотношении их размеров может обеспечить высокие темпы роста прочности цементного камня на ранней стадии и его плотность, а также определенный запас реликтов грубодисперсных частиц, вносящих значимый вклад в долговечность бетона, путем самозалечивания дефектов структуры, возникающих в процессе эксплуатации конструкций гидромелиоративных сооружений.

4. Для повышения плотности и коррозионной стойкости бетона было принято решение ввести в состав бетонной смеси активную минеральную добавку – микрокремнезем марки МКУ-95.

ГЛАВА 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Методы исследований

Для определения основных характеристик сырьевых материалов, бетонных смесей в вязкопластичной стадии и затвердевшего бетона применялись общепринятые в строительной практике нормативные методы, дающие высокую точность, достоверность и воспроизводимость результатов. Эксперименты проводились в строгом соответствии с методикой, образцы подготавливались посерийно с соблюдением всех параметров выдержки и хранения до испытания.

Общая схема исследования включала в себя логически взаимосвязанные этапы современного научного метода, в частности, концептуального планирования эксперимента с выделением наиболее важных исследуемых характеристик, определения необходимых свойств исходных компонентов, расчёта требуемых дозировок, основанного на рабочей гипотезе, непосредственного эксперимента с контролем характеристик на всех его стадиях, статистической обработки результатов эксперимента, анализа результатов и последующей оптимизации, проведения следующей подтверждающей серии экспериментов по вышеприведённому плану. Подробно суть эксперимента раскрывается далее в соответствующих разделах диссертации.

Использованные в работе материалы выбирались с учётом критериев доступности на строительном рынке России, условий работы местных строительных организаций Московского региона, технологичности и известности специалистам-строителям.

Нормативные документы и методы исследований сырьевых материалов представлены в таблице 2.1. Нормативные документы и методы исследований тяжелой бетонной смеси и бетона из неё представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.1 – Методы исследований сырьевых материалов

| Характеристики сырьевых материалов | Методы исследований |
|--|--|
| Химический состав портландцемента | Метод рентгенофлуоресцентной спектроскопии |
| Минеральный состав сырьевых материалов | Рентгенодифрактометрический метод |
| Отбор проб цемента | ГОСТ 30515-2013 |
| Нормальная плотность цементного теста | ГОСТ 30744-2001 |
| Равномерность изменения объема | ГОСТ 30744-2001 |
| Тонкость помола цемента | ГОСТ 30744-2001 |
| Активность цемента | ГОСТ 30744-2001 |
| Плотность цемента | ГОСТ 30744-2001 |
| Сроки схватывания цемента | ГОСТ 30744-2001 |
| Удельная эффективная активность естественных радионуклидов | ГОСТ 30108-94 |
| Гранулометрический состав песка, влажность, средняя и насыпная плотность, модуль крупности | ГОСТ 8735–88 |
| Гранулометрический состав гранитного щебня, средняя и насыпная плотность, форма зёрен | ГОСТ 8269.0-97 |
| Оценка воды затворения | ГОСТ 23732-2011 |
| Условная эффективность модифицирующих добавок | ГОСТ 30459-2008 |
| Гранулометрический состав мелкодисперсных порошкообразных материалов | Метод лазерной гранулометрии |

Таблица 2.2 – Методы исследований тяжелой бетонной смеси и бетона

| Исследуемые свойства бетона и бетонной смеси | Методика исследований |
|--|---|
| Оптимизация состава бетонной смеси | Метод математического планирования эксперимента методом ортогонального планирования второго порядка |
| Моделирование упаковок зернистых систем и расчет оптимальной гранулометрии | Программный комплекс на основе модифицированного метода «Drop and Roll» |
| Отбор пробы бетонной смеси | ГОСТ 10181-2014 |
| Удобоукладываемость бетонной смеси | ГОСТ 10181-2014 |

Продолжение таблицы 2.2

| Исследуемые свойства бетона и бетонной смеси | Методика исследований |
|---|----------------------------------|
| Средняя плотность бетонной смеси | ГОСТ 10181-2014 |
| Предел прочности бетона на сжатие | ГОСТ 10180-2012 |
| Предел прочности бетона на растяжение (при изгибе образца-призмы) | ГОСТ 10180-2012 |
| Трещиностойкость бетона | ГОСТ 29167-21 |
| Водонепроницаемость бетона | ГОСТ 12730.5-2018 |
| Водопоглощение бетона | ГОСТ 12730.3-2020 |
| Стойкость бетона к коррозии различных типов | ГОСТ 31383-2008 ГОСТ 27677-88 |
| Минеральный состав цементного камня | Рентгенофазовый анализ |

Изготовление образцов и основные эксперименты были проведены на лабораторной базе кафедры «Строительное материаловедение» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ).

2.1.1 Получение тонкодисперсных фракций клинкерного компонента

Для подтверждения рабочей гипотезы в части возможности получения направленного структурообразования цементного камня за счёт трёх аналитически подобранных фракций зёрен цемента, было необходимо провести контролируемый помол клинкерного компонента. Зёрна клинкера предварительно просеивались, после чего подвергались дроблению на стандартной щёковой дробилке и последующему тонкому помолу по подобранным режимам, обеспечивающим получение зёрен вяжущего требуемой удельной поверхности. Для тонкого помола использовалась планетарная шаровая мельница Fritsch Pulverisette 7 (Германия), показанная на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Планетарная шаровая мельница Pulverisette 7

Последовательно были получены три серии образцов тонкоизмельчённого вяжущего с удельной поверхностью 150, 300 и 450 м²/кг соответственно.

Тонкость помола вяжущего контролировалась путём рассева навески на стандартном наборе сит согласно ГОСТ 30744-2001 [117].

Измерение получаемой удельной поверхности и последующий расчёт размера частиц тонкоизмельчённого вяжущего проводилось при помощи прибора для определения удельной поверхности и среднего размера частиц дисперсных материалов ПСХ-11М (Россия), представленного на рисунке 2.2. Прибор в своей работе использует метод газопроницаемости Козени-Кармана, заключающийся в определении времени прохождения фиксированного объема воздуха через слой образца, после чего производится расчёт удельной поверхности с коррекцией вязкости воздуха с учётом его температуры.



Рисунок 2.2 – Прибор ПСХ-11М

2.1.2 Моделирование упаковок зернистых систем и расчет оптимальной гранулометрии

Моделирование внутренней структуры цементного камня требовало предварительного создания модели упаковки тонкодисперсных фракций вяжущего в условном объёме и последующего анализа воздействия процессов гидратации вяжущего и структурообразования на общую структуру матрицы цементного камня. Для это был использован программный комплекс на основе модифицированного метода «Drop and Roll». Построение расчётной модели происходит путём постепенного заполнения сферами единичного объема условной кубической ячейки, в которую они попадают по очереди в случайном месте и в случайном порядке [118]. Входными параметрами программы являются размер условной пространственной ячейки, количество сфер различных фракций и их физические свойства. На выходе формируется массив центров помещенных сфер, их радиусы и индексы сфер, с которыми они соприкасаются. Полученная модель была аналитически приведена к модели упаковки гидратировавших

частиц вяжущего в матрице цементного камня.

2.1.3 Рентгенофазовый анализ

Для определения вещественного и фазового составов частиц исследуемого полидисперсного вяжущего, микрокремнезема марки МКУ-95, а также полученного модифицированного цементного камня, был проведён рентгенофазовый анализ (РФА). Для проведения исследований был использован порошковый рентгеновский дифрактометр ДРОН-3М (Россия), представленный на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Рентгеновский дифрактометр ДРОН-3М

Перед проведением испытания образцы материалов подготавливались тонким измельчением навески в агатовой ступке до требуемой удельной поверхности. Образцы устанавливались в рабочую камеру прибора и подвергались воздействию излучения, полученная рентгенограмма идентифицировалась и расшифровывалась [119].

2.1.4 Исследование физико-механических характеристик бетонных образцов

Для определения пределов прочности на сжатие и изгиб, водонепроницаемости и коррозионной стойкости были изготовлены образцы-кубы с ребрами 150, 100 и 70 мм, образцы-цилиндры диаметром 150 мм и

высотой 150 мм, а также образцы-призмы размером 70×70×280 мм.

Пределы прочности при сжатии полученных цементных камней и бетонов контролировались согласно ГОСТ 10180-2012 при помощи автоматической испытательной прессовой системы Controls MCC8 (Италия-Германия), представленной на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Автоматическая испытательная система Controls MCC8

Образцы-кубы размером 150×150×150 мм изготавливали серией по 3 штуки для каждого состава в соответствии с ГОСТ 10180-2012 [120]. Уплотнение бетонной смеси в формах производили на виброплощадке лабораторной СМЖ-539М, представленной на рисунке 2.5. Образцы выдерживались в камере нормального твердения в нормальных условиях в течение 28 суток, после чего извлекались, устанавливались в пресс и нагружались при постоянной скорости нарастания нагрузки $(0,6 \pm 0,2)$ МПа/с до их разрушения с контролем разрушающего усилия [121].



Рисунок 2.5 – Виброплощадка лабораторная СМЖ -539М

Предел прочности при сжатии определялся как среднее арифметическое значений пределов прочностей образцов серии (исключая не вошедшие в доверительный интервал).

Пределы прочности при изгибе полученных цементных камней и бетонов контролировались согласно ГОСТ 10180-2012 при помощи универсальной испытательной машины Zwick Z010 Proline (Германия), представленной на рисунке 2.6.

Образцы-призмы размером 70×70×280 мм изготавливались согласно ГОСТ 10180-2012 сериями по три образца с учетом среднего внутрисерийного коэффициента вариации прочности бетона. Контролировались геометрические показатели отклонения плоскостности граней и перпендикулярности ребер, а также качество поверхности прилегания рабочих органов пресса. Образцы выдерживались в камере нормального твердения в нормальных условиях в течение 28 суток, после чего извлекались, устанавливались в пресс и нагружались при постоянной скорости нарастания нагрузки $(0,05 \pm 0,01)$ МПа/с до их разрушения с контролем разрушающего усилия и характера разрушения образца.



Рисунок 2.6 – Испытательная машина Zwick Z010 серии Proline

После проведения испытания обрабатывали и оценивали полученные результаты. Растяжение при изгибе R_{tb} вычисляли с точностью до 0,01 МПа по формуле (2.1) [121]:

$$R_{tb} = \delta \frac{Fl}{ab^2} K_W \quad (2.1)$$

где: F – разрушающая нагрузка, Н;

δ – масштабный коэффициент для приведения прочности бетона к прочности бетона в образцах базовых размера и формы;

a, b, l – ширина, высота поперечного сечения призмы и расстояние между опорами соответственно при испытании образцов на растяжение при изгибе, мм;

K_W – поправочный коэффициент для ячеистого бетона, учитывающий влажность образцов в момент испытания.

Для определения трещиностойкости образцов при неравновесных испытаниях в соответствии с ГОСТ 29167-21 использовалась сервогидравлическая система Form+Test DELTA 5-300 (Германия), представленная на рисунке 2.7 [122].



Рисунок 2.7 – Установка DELTA 5-300, Form+Test (Германия)

Образцы-призмы размером $70 \times 70 \times 280$ мм (размер коррелирует с максимальным размером зерна заполнителя 5,0 мм) изготавливались сериями по четыре образца в каждой для каждого состава. В центре образца был сделан начальный надрез длиной 25 мм и шириной 2 мм.

Перед началом испытаний проводились два цикла нагружения – разгружения до нагрузки, составляющей 10% ожидаемой максимальной нагрузки. Скорость нагружения образцов устанавливали по скорости перемещения нагружающей плиты пресса в пределах 0,02-0,2 мм/с; при этом время испытаний составляло не менее 1 мин.

Характеристику трещиностойкости по результатам неравновесных испытаний образцов типа 1 определяли по зависимости [122]:

$$K_c^* = \frac{3F_c^* L_0}{2b^{\frac{1}{2}} t} \sqrt{\frac{a_0}{b}} (1,93 - 3,07\lambda + 14,53\lambda^2 - 25,11\lambda^3 + 25,8\lambda^4), \quad (2.2)$$

где: K_c – критический коэффициент интенсивности напряжений при максимальной нагрузке, МПа \times м^{0,5};

F_c^* – нагрузка, соответствующая динамическому началу движения магистральной трещины при неравновесных испытаниях, МН;

b, t, L_0, L, D – размеры образца, м;

a_0 – длина начального надреза, м;

λ – относительная длина начального надреза, $\lambda = a_0/b$;

K_c^* – условный коэффициент интенсивности напряжений.

Модуль упругости бетонных образцов определялся в соответствии с ГОСТ 24452-80. Бетонные образцы-призмы размерами 150×15×600 мм изготавливались сериями по три образца для каждого из составов, после чего подвергались испытанию и аналитической обработке результатов [123].

2.1.5 Определение морозостойкости бетона

Для определения стойкости разработанных бетонных смесей к действию агрессивных условий окружающей среды были проведены комплексные испытания, включающие в себя определение морозостойкости бетонного камня, химической стойкости и т.п.

Высокая морозостойкость (не менее 300 циклов) необходима для обеспечения максимальной долговечности разработанных железобетонных лотков оросительных систем. Условия эксплуатации лотков подразумевают постоянное нахождение их в увлажненном состоянии внутри лотков (вода орошения) в любое время года.

Морозостойкость разработанных бетонных лотков определялась согласно с требованиями с ГОСТ 10060-2012 [124]. Для определения морозостойкости использовался первый базовый метод. Образцы для испытания представляли собой серию бетонных кубиков с ребром 100 мм, шесть из которых были приняты в качестве контрольных, а двенадцать имели в своем составе введенные добавки в соответствии с разработанным планом эксперимента. Время выдержки образцов составила 24 часа при погружении на 1/3 высоты образцов, 24 часа при погружении на 2/3 высоты образцов и 48 часов при полном погружении. Процесс испытания шел до появления структурных дефектов образцов – трещин, сколов и шелушения, потери массы и потери прочности образцов более чем на 5% от требуемого значения [121, 124].

2.1.6 Определение водопоглощения, водонепроницаемости и пористости бетона

Для определения эффективности взаимодействия воды с матрицей разработанного бетона и, как следствие, эффективности диффузионных процессов внутри матрицы, влияющих на разрушение структуры бетонного камня и возможной потери влаги при орошении, проводилось определение пористости бетона, его водопоглощение и водонепроницаемость.

Для определения водопоглощения был применен метод последовательного насыщения образцов водой до постоянной массы согласно ГОСТ 12730.3-2020 [125]. Использованные образцы-кубы имели ребро 100 мм, изготавливались из бетонных смесей разработанных составов. Образцы твердели в нормальных условиях на протяжении 28 суток. Серия образцов для испытания составляла 3 куба плюс контрольный для каждого из составов. По завершении испытания водопоглощение отдельного бетонного образца по массе (W_m) в процентах рассчитывалось по формуле (2.3) [121]:

$$W_m = \frac{m_{\text{нас}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}}} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

где: W_m – водопоглощение отдельного бетонного образца по массе, %;

m_c – масса высушенного образца, г;

m_B – масса водонасыщенного образца, г.

Определив водопоглощение по массе, рассчитывалось водопоглощение по объему (W_o) по формуле (2.4) [126]:

$$W_o = \frac{m_{\text{нас}} - m_{\text{сух}}}{V_e \cdot \rho_{H_2O}} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

где: W_m – водопоглощение отдельного бетонного образца по объёму,

$m_{\text{нас}}$ – масса материала, насыщенного до постоянной массы, г;

m_c – масса сухого материала, г;

V_e – объем материала в естественном состоянии, см³;

ρ_{H_2O} – плотность воды, г/см³

Водопоглощение серии образцов каждого состава определялось как среднее

арифметическое значений водопоглощений каждого образца серии.

Пористость образцов разработанных составов определялась путем оценки кинетики водопоглощения методом дискретного взвешивания в соответствии с ГОСТ 12730.4-2020 «Бетоны. Методы определения параметров пористости». Образцы-кубы имели ребро 70 мм, серии испытаний включали в себя два образца каждого состава. Значение пористости рассчитывалось как среднее арифметическое.

Водонепроницаемость разработанных бетонных изделий определялась при помощи метода «мокрого пятна» согласно требованиям ГОСТ 12730.5-2018 [126]. Для определения водонепроницаемости из разработанных составов изготавливались образцы-цилиндры диаметром 150 мм и высотой 150 мм. Согласно ГОСТ 24587-81[127] и технологическим условиям изготовления лотков, наибольшая крупность заполнителя в них не должна превышать 15 мм. Образцы-цилиндры также имели в своем составе максимальный размер заполнителя 15 мм.

Было подготовлено по 6 образцов каждого состава в серии. Образцы до испытания выдерживались в камере нормального твердения в нормальных условиях в течение суток перед проведением испытаний.

Определение водонепроницаемости проводилось при помощи установки Form+Test WE 6 MMZ (Германия), представленной на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Установка для определения водонепроницаемости бетонных

образцов методом «мокрого пятна» Form+Test WE 6 MMZ

Образцы устанавливались в посадочные устройства установки, манжеты которой предварительно смазывались водонепроницаемой смазкой. Давление воды поднималось ступенчато с последующей выдержкой (0,2 МПа в течение 1-5 минут) и длительностью воздействия воды под давлением, равной 12 часам на каждой ступени. При появлении «мокрого пятна», равно как и иных признаков проникновения воды в различные места образца испытание прекращалось. Значение максимального давления воды, при котором не менее чем на четырех образцах из шести, не наблюдалась фильтрация воды, было принято показателем водонепроницаемости образца [121].

2.1.7 Определение коррозионной стойкости бетонных образцов

Основными коррозионными агентами, действующими на бетон разработанных составов при работе в лотке, являются мягкие и средней мягкости оросительные воды. В составе этих вод могут быть растворены различные химические соединения, сопутствующие агротехническим процессам. Мягкие воды могут приводить к вымыванию из толщи бетона легкорастворимых веществ и, соответственно, к коррозии первого вида (вымывание портландита) и второго вида.

Для определения коррозионной стойкости разработанных составов были проведены прямые испытания методом погружения образцов в среду различной агрессивности и последующей выдержки до появления признаков разрушения согласно ГОСТ 27677-88 [128].

Также проводился сравнительный анализ полученных результатов определения стойкости образцов, помещенных в неагрессивную среду, со значениями показателей образцов того же состава, помещенных в более агрессивные среды.

Серия испытаний образцов для каждого состава включала в себя три основных образца-куба с ребром 100 мм и три таких же контрольных. Две

аналогичных серии образцов параллельно погружались в агрессивные и неагрессивную среды. Образцы выдерживались до испытания в нормальных условиях. В качестве агрессивных сред были выбраны водный раствор 5%-ного сульфата натрия (Na_2SO_4), 3%-ного хлорида натрия (NaCl), дистиллированной воды и 0,01%-ного раствора соляной кислоты (HCl). В качестве неагрессивной среды применялась бутилированная питьевая вода. Перед началом испытаний образцы были высушены и взвешены. Продолжительность выдержки серии образцов в среде составляла шесть месяцев. После завершения выдержки серия образцов (включая контрольные) использовалась для определения прочностных характеристик – пределов прочностей на изгиб и на сжатие. Значением соответствующего предела прочности было принято среднее арифметическое значение результатов серии.

Потеря массы образцов по результатам испытания рассчитывалась согласно формуле (2.5) [128]:

$$\Delta m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \% \quad (2.5)$$

где: Δm – потеря массы образцов, %;

m_1 – масса образца до начала испытания, г;

m_2 – масса образца после испытания, г.

Рассчитывалась потеря массы для образцов, выдержанных в агрессивных средах и в неагрессивной среде. Полученные результаты сравнивались в паре «агрессивная среда – неагрессивная».

После этого для каждой из указанных пар серии образцов было установлено изменение предела прочности на растяжение при изгибе ($\Delta R_{\text{тб}}$, %) и сжатие (ΔR , %) по формулам (2.6) и (2.7) [128]:

$$\Delta R = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times 100 \% \quad (2.6)$$

где: ΔR – изменение предела прочности на сжатие, %;

R_1 – предел прочности на сжатие контрольных образцов (перед производством испытания), МПа;

R_2 – предел прочности на сжатие основных образцов (по завершению испытания), МПа.

$$\Delta R_{tb} = \frac{R_{2tb} - R_{1tb}}{R_{1tb}} \times 100 \% \quad (2.7)$$

где: ΔR_{tb} – изменение предела прочности на растяжение при изгибе, %;

R_{1tb} – предел прочности на растяжение при изгибе контрольных образцов (перед производством испытания), МПа;

R_{2tb} – предел прочности на растяжение при изгибе основных образцов (по завершению испытания), МПа.

Полученные значения пределов прочностей в соответствующих средах сводились в таблицу и были проанализированы для выявления коррозионной стойкости разработанных составов в соответствующей среде.

2.2 Характеристики исходных материалов

2.2.1 Гидравлическое вяжущее вещество

В качестве контрольного вяжущего и средней фракции полифракционного вяжущего был выбран бездобавочный портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, соответствующий требованиям [129, 130] производства компании ООО «Холсим (Рус) СМ», завод которой расположен по адресу 140414, Россия, г. Коломна ул. Цементников, д. 1.

Заявленные производителем характеристики были подтверждены экспериментально, дополнительно были исследованы его минеральный, фазовый и химический состав. Результаты представлены в таблицах 2.3 – 2.5. Графическое отображение данных РФА представлено на рисунке 2.9.

Таблица 2.3 – Химический состав портландцемента

| Марка цемента | Завод-изготовитель | Химический состав, мас. % | | | | | | |
|---------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|-------------------|
| | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Na ₂ O |
| ЦЕМ I 42,5Н | ООО «Холсим (Рус) СМ» | 23,8 | 5,89 | 3,9 | 64,1 | 0,88 | 0,6 | 0,83 |

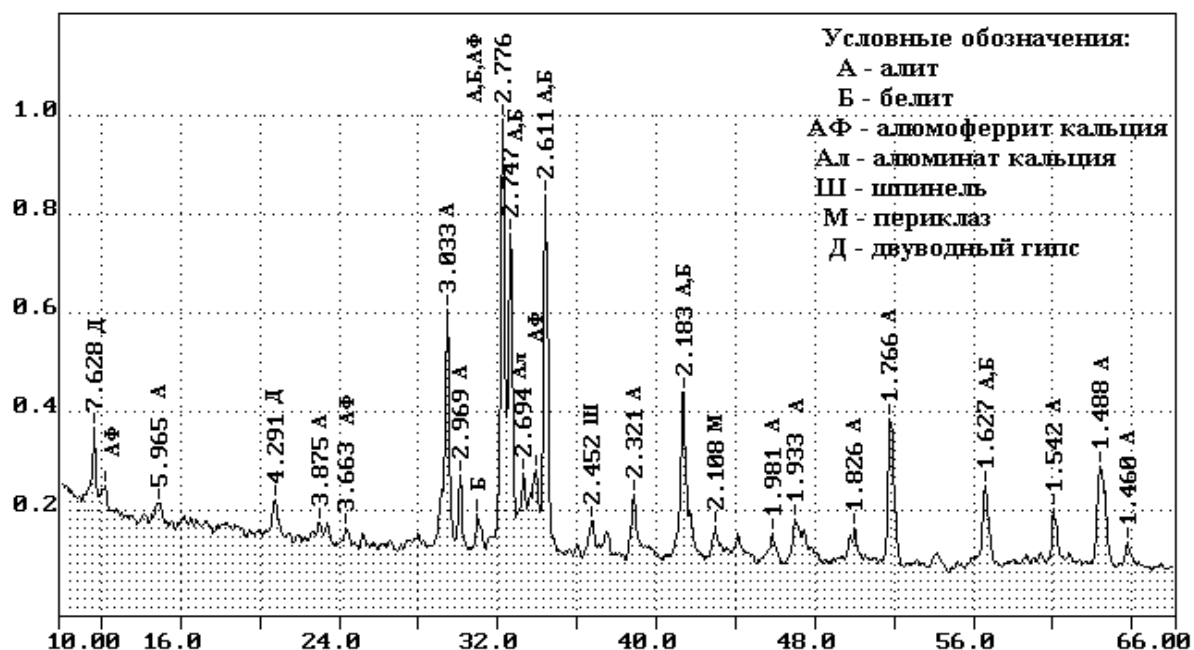


Рисунок 2.9 – Рентгенофазовый анализ портландцементного клинкера

Таблица 2.4 – Минеральный состав клинкера портландцемента

| Марка цемента | Содержание минералов в клинкере, % | | | |
|---------------|------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF |
| ЦЕМ I 42,5Н | 60,92 | 11,5 | 6,97 | 10,74 |

Таблица 2.5 – Результаты испытаний портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н

| Показатель | Требование ГОСТ 31108-2020 | Фактическое значение |
|---|-------------------------------|-------------------------|
| Остаток на сите 45 мкм, % | - | 3,1 |
| Остаток на сите 80 мкм, % | - | 0,5 |
| Нормальная плотность цементного теста, % | - | 26,0 |
| Тест на равномерность изменения объема (Кольцо Ле- Шателье), расширение, мм | 10 | 7 |
| Удельная поверхность (по Блейну), см ² /г | - | 3500 |
| Начало схватывания, мин | не ранее 60 | 175 |
| Конец схватывания, мин | - | 500 |
| Наличие признаков ложного схватывания, да/нет | нет | нет |

Продолжение таблицы 2.5

| Показатель | Требование ГОСТ 31108-2020 | Фактическое значение |
|--|-------------------------------|-------------------------|
| Средняя прочность на сжатие в возрасте 2 сут., МПа | не менее 10 | 26,5 |
| Средняя прочность на сжатие в возрасте 28 сут., МПа | не менее 42,5 | 45,5 |
| | не более 62,5 | |
| Истинная плотность, кг/м ³ | - | 3150 |
| Насыпная плотность, кг/м ³ | - | 1250 |

Для получения остальных фракций полидисперсного вяжущего использовался портландцементный клинкер, соответствующий требованиям ГОСТ [128, 129]. Заводом-изготовителем является ООО «Холсим (Рус) СМ», адрес производства: 140414, Россия, г. Коломна ул. Цементников, д. 1. Характеристики и результаты испытаний его свойств представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты испытаний портландцементного клинкера

| Наименование показателя | Требование ГОСТ 34850-2022 | Значение |
|---|-------------------------------|-----------------|
| Оксид магния (MgO), % | не более 5,0 | 3,0 |
| Оксид кальция свободный (CaO _{св}) | не более 2,0 | 1,5 |
| Массовое отношение оксида кальция к оксиду кремния (CaO/SiO ₂), % | не менее 2,0 | 2,5 |
| Суммарное содержание трехкальциевого и двухкальциевого силикатов (3CaO-SiO ₂ +2CaO-SiO ₂), % | не менее 67 | 70 |
| Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг | не более 370 | не более 370 |

Для регулирования процесса схватывания полидисперсного вяжущего в измельчённый клинкер вводился сульфат кальция, измельчённый до удельной поверхности в 3000 см²/г. В качестве сульфата кальция применялся двухводный гипс (CaSO₄), соответствующий требованиям [129, 130].

2.2.2 Крупный и мелкий заполнитель

В качестве мелкого заполнителя применяли природный песок производства ООО «Хромцовский карьер», расположенного в п. Хромцово Ивановской области.

Основные характеристики песка соответствуют требованиям ГОСТ [131] и приведены в таблице 2.7, а химический состав песка – в таблице 2.8.

Таблица 2.7 – Результаты испытаний песка

| Производитель | Характеристика песка | | | | |
|--------------------------|----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---|
| | Модуль крупности | Истинная плотность, кг/м ³ | Насыпная плотность, кг/м ³ | Содержание глинистых и пылевидных частиц, % | Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг |
| ООО «Хромцовский карьер» | 2,5 | 2625 | 1620 | 1,3 | 75,1 |

Таблица 2.8 – Химический состав применяемого песка

| Производитель | Основные оксиды, % | | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|------------------|-------------------|-------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | п.п.п |
| ООО «Хромцовский карьер» | 71,14 | 15,30 | 2,70 | 2,50 | 0,65 | 0,01 | 3,30 | 2,70 | 1,70 |

Радиационно-гигиеническая оценка исследуемых песков показала, что данные материалы относятся к 1 классу радиоактивности ($A_{эфф}$ менее 370 Бк/кг согласно требованиям [132]).

По содержанию глинистых, пылевидных примесей, гранулометрическому составу и радиационно-гигиенической оценке данный песок соответствует требованиям ГОСТа [131].

В качестве крупного заполнителя использовался гранитный щебень фракции от 5 до 15 мм, производства ООО «Богаевкий карьер», Московская область, Рузский городской округ, деревня Орешки, характеристики которого приведены в таблице 2.8. Наибольшая крупность заполнителя, применяемого для приготовления бетона лотков для оросительных систем, должна быть не более 15

мм по требованию ГОСТ [127].

Таблица 2.9 – Результаты испытаний крупного заполнителя (гранитный щебень)

| Исследуемая характеристика | Показатель |
|--|------------|
| Зерна пластинчатой и игловатой формы, % | 12,0 |
| Пылевидные, илистые и глинистые частицы, % | 0,93 |
| Марка щебня по дробимости | 1400 |
| Марка щебня по морозостойкости | 300 |
| Насыпная плотность, кг/м ³ | 1385 |
| Удельная эффективная активность радионуклидов ($A_{эфф}$), Бк/кг | 90 |
| Марка щебня по истираемости | И-1 |

Анализ результатов таблицы 2.9 показал, что крупный заполнитель соответствует требованиям ГОСТа [133].

2.2.3 Вода затворения

Для затворения бетонной смеси использовалась вода, соответствующая требованиям ГОСТ [134]. Вода не содержит сульфатов более 2700 мг/л (в пересчете на SO₄), всех солей более 5000 мг/л, нефтяной шлам и накипь, содержание органических веществ менее 15 мг/л, pH 7,8, цвет отсутствует.

2.2.4 Суперпластифицирующая добавка «Melflux 5581 F»

В качестве пластифицирующей добавки использовалась добавка-суперпластификатор Melflux 5581 F производства BASF Construction Additives (Германия), соответствующая требованиям ГОСТ 24211-2008 [51].

Melflux 5581 F выполнен на основе эфиров поликарбоксилата, используется, как разжижитель и противоусадочный компонент для сухих строительных смесей (ССС) и других строительных материалов на основе портландцемента, гипса и их смесей. Обеспечивает высокую раннюю прочность, оптимальную когезию и максимальное самоуплотнение при низком расходе. Рекомендуемая

производителем дозировка сухого поликарбонатного суперпластификатора Melflux 5581 F составляет 0,03-0,5 % от массы вяжущего.

Нормируемые физико-химические показатели представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Физико-химические показатели добавки Melflux 5581 F

| Химическая основа | Эфир поликарбоната |
|---|--|
| Метод получения | распылительная сушка из раствора, полученного в результате поликонденсации |
| Форма | порошок |
| Цвет | желтоватый |
| Насыпная плотность, кг/м ³ | 300-600 |
| Летучие (потери при нагревании), мас. % | макс. 2,0 |
| pH 20% раствора при 200°C | 6,5-8,5 |

2.2.5 Полимерная добавка «Полидон-А»

В качестве водорастворимой полимерной добавки использовали добавку «Полидон-А» производства ООО «Оргполимерсинтез», г. Санкт-Петербург, соответствующую требованиям ТУ 9365-002-46270704-2001.

«Полидон-А» представляет собой водный раствор поливинилпирролидона C₆H₉NO, плотностью около 1200 кг/м³, вязкостью от 3000 до 6000 МПа с при 25 °С, температурой плавления: 150-180 °С. Хорошо смешивается со спиртами, водосодержащими растворами, хлороформом. Растворяется в воде и полярных растворах, но почти не совместим с эфирами.

2.2.6 Микрокремнезём МКУ-95

В применялся уплотнённый коллоидный микрокремнезём МКУ-95, произведённый «ООО НТЦ «ЭВЕРЕСТ»», г. Липецк.

Химический состав микрокремнезёма в пересчёте на основные оксиды был проведён при помощи рентгенофазового анализа при помощи рентгенографа ДРОН-3. Указанный микрокремнезём имеет высокое содержание аморфного и стекловидного оксида кремния (до 95% SiO₂ по массе) содержание остальных

оксидов невысоко. Результаты анализа химического состава микрокремнезёма представлены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Качественные характеристики микрокремнезема марки МКУ-95

| Вещество | Массовая доля, % |
|---|------------------|
| Диоксид кремния SiO_2 | не менее 95,0 |
| Оксида фосфора P_2O_5 | не более 0,09 |
| Оксид магния MgO | не более 0,7 |
| Оксид алюминия Al_2O_3 | не более 0,17 |
| Оксид железа Fe_2O_3 | не более 0,1 |
| Серный ангидрид SO_3 | не более 0,43 |
| Оксид кальция CaO | не более 0,25 |
| Свободные щелочи Na_2O , K_2O | не более 1,21 |
| Вода | не более 0,3 |

На рисунке 2.10 представлена рентгенограмма микрокремнезема, показывающая основные пики, соответствующие выявленным оксидам.

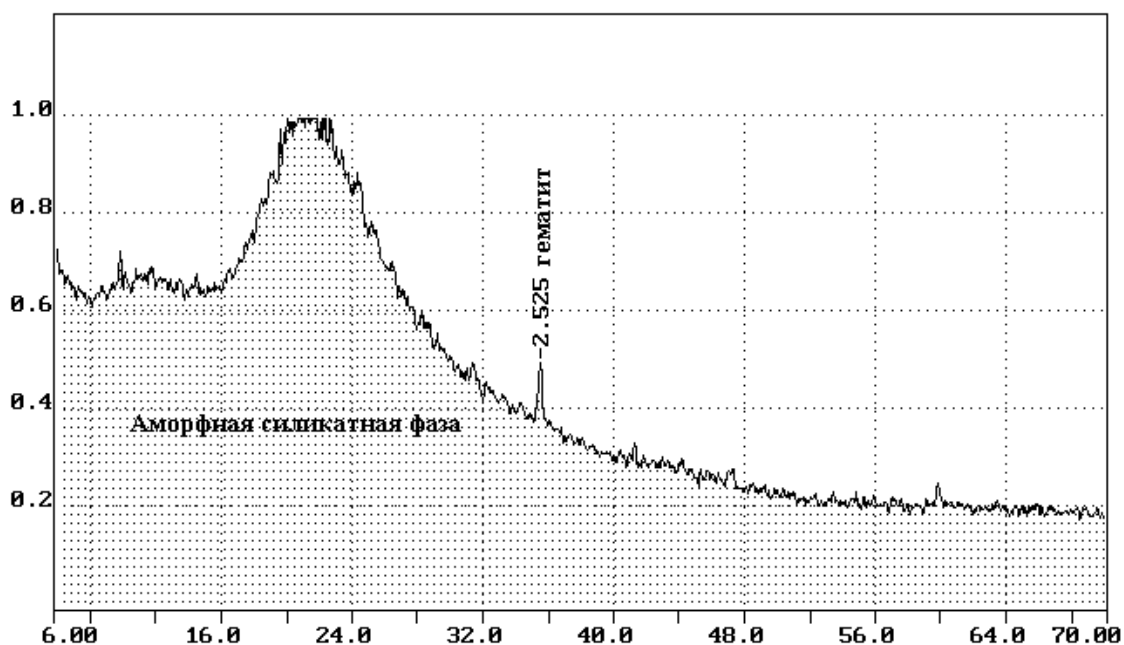


Рисунок 2.10 – Рентгенофазовый анализ микрокремнезема

Для определения гранулометрического состава навески микрокремнезёма был использован ультразвуковой анализатор размеров частиц Fritsch ANALYSETTE 22 NanoТес в диапазоне 0,01...2100 мкм. Выявленное

распределение по фракциям представлено в таблице 2.12, а кумулятивное распределение частиц микрокремнезёма – в таблице 2.13.

Таблица 2.12 – Фракционный состав микрокремнезема марки МКУ-95

| Размер частиц, мкм | | Содер- жание, % | Размер частиц, мкм | | Содер- жание, % | Размер частиц, мкм | | Содер- жание, % |
|-----------------------|------|--------------------|-----------------------|-------|--------------------|-----------------------|---------|--------------------|
| От | До | | От | До | | От | До | |
| 0 | 0,01 | 0 | 1,93 | 2,13 | 0,7 | 62,35 | 68,87 | 1,2 |
| 0,01 | 0,02 | 0 | 2,13 | 2,35 | 0,8 | 68,87 | 76,06 | 0,4 |
| 0,02 | 0,05 | 0 | 2,35 | 2,59 | 0,8 | 76,06 | 84,01 | 0,1 |
| 0,05 | 0,09 | 0 | 2,59 | 2,86 | 0,9 | 84,01 | 92,78 | 0 |
| 0,09 | 0,1 | 0 | 2,86 | 3,16 | 0,9 | 92,78 | 102,48 | 0 |
| 0,1 | 0,11 | 0 | 3,16 | 3,49 | 0,9 | 102,48 | 113,18 | 0 |
| 0,11 | 0,12 | 0 | 3,49 | 3,86 | 0,9 | 113,18 | 125,01 | 0 |
| 0,12 | 0,13 | 0 | 3,86 | 4,26 | 1 | 125,01 | 138,07 | 0 |
| 0,13 | 0,15 | 0 | 4,26 | 4,71 | 1 | 138,07 | 152,5 | 0 |
| 0,15 | 0,16 | 0 | 4,71 | 5,2 | 1,1 | 152,5 | 168,43 | 0 |
| 0,16 | 0,18 | 0 | 5,2 | 5,74 | 1,3 | 168,43 | 186,03 | 0 |
| 0,18 | 0,2 | 0 | 5,74 | 6,34 | 1,5 | 186,03 | 205,46 | 0 |
| 0,2 | 0,22 | 0 | 6,34 | 7,01 | 1,7 | 205,46 | 226,93 | 0 |
| 0,22 | 0,24 | 0 | 7,01 | 7,74 | 2,1 | 226,93 | 250,64 | 0 |
| 0,24 | 0,26 | 0 | 7,74 | 8,55 | 2,5 | 250,64 | 276,82 | 0 |
| 0,26 | 0,29 | 0 | 8,55 | 9,44 | 2,9 | 276,82 | 305,75 | 0 |
| 0,29 | 0,32 | 0 | 9,44 | 10,42 | 3,3 | 305,75 | 337,69 | 0 |
| 0,32 | 0,36 | 0 | 10,42 | 11,51 | 3,7 | 337,69 | 372,97 | 0 |
| 0,36 | 0,39 | 0 | 11,51 | 12,72 | 4 | 372,97 | 411,94 | 0 |
| 0,39 | 0,43 | 0 | 12,72 | 14,04 | 4,3 | 411,94 | 454,98 | 0 |
| 0,43 | 0,48 | 0 | 14,04 | 15,51 | 4,4 | 454,98 | 502,51 | 0 |
| 0,48 | 0,53 | 0 | 15,51 | 17,13 | 4,3 | 502,51 | 555,02 | 0 |
| 0,53 | 0,58 | 0 | 17,13 | 18,92 | 4,2 | 555,02 | 613 | 0 |
| 0,58 | 0,65 | 0 | 18,92 | 20,9 | 4 | 613 | 677,05 | 0 |
| 0,65 | 0,71 | 0 | 20,9 | 23,08 | 3,9 | 677,05 | 747,79 | 0 |
| 0,71 | 0,79 | 0 | 23,08 | 25,49 | 3,8 | 747,79 | 825,91 | 0 |
| 0,79 | 0,87 | 0 | 25,49 | 28,16 | 3,8 | 825,91 | 912,2 | 0 |
| 0,87 | 0,96 | 0,1 | 28,16 | 31,1 | 4 | 912,2 | 1007,51 | 0 |
| 0,96 | 1,06 | 0,1 | 31,1 | 34,35 | 4,3 | 1007,51 | 1112,77 | 0 |
| 1,06 | 1,17 | 0,2 | 34,35 | 37,94 | 4,5 | 1112,77 | 1229,04 | 0 |
| 1,17 | 1,29 | 0,3 | 37,94 | 41,9 | 4,6 | 1229,04 | 1357,44 | 0 |
| 1,29 | 1,43 | 0,3 | 41,9 | 46,28 | 4,5 | 1357,44 | 1499,27 | 0 |
| 1,43 | 1,58 | 0,4 | 46,28 | 51,11 | 3,9 | 1499,27 | 1655,91 | 0 |
| 1,58 | 1,74 | 0,5 | 51,11 | 56,45 | 3,1 | 1655,91 | 1828,92 | 0 |
| 1,74 | 1,93 | 0,6 | 56,45 | 62,35 | 2,1 | 1828,92 | 2100 | 0 |

Таблица 2.13 – Кумулятивное распределение частиц микрокремнезема МКУ-95

| | | | | | | | | | |
|----------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| Q3(d), % | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| d, мкм | 4,35 | 8,31 | 11,31 | 14,36 | 18,54 | 23,41 | 30,0 | 37,1 | 47,15 |

Анализ полученных результатов таблицы 2.12 и 2.13 показал, что основной диапазон частиц микрокремнезема составляет от 7,02 мкм до 60,25 мкм.

2.2.7 Микроармирующий компонент в виде базальтового волокна

Для дисперсного армирования бетонного камня было выбрано рубленое базальтовое волокно, изготовленное в соответствии с ТУ 5952-002-13307094-08 [136]. В отличие от стального волокна, базальтовое обладает более высокой стойкостью к коррозии. По сравнению с полимерными волокнами базальтовое волокно имеет меньший модуль упругости и не подвергается старению. Внешний вид базальтового волокна представлен на рисунке 2.11.



Рисунок 2.11 – Внешний вид базальтового волокна

Температура плавления базальтового волокна составляет 1450°C, средняя длина отрезка фибры равна 12,67 мм, диаметр элементарного волокна - 16,19 мкм, относительное удлинение при разрыве – 1,4-3,6%, прочность на растяжение R_t – 2,8-3,4 МПа·10³, истинная плотность фибры – 2,63 г/см³, модуль упругости фибры E_f 100-130 МПа·10³, стойкость к воздействию щелочей и неорганических кислот высокая.

ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СОСТАВА МОДИФИЦИРОВАННОГО ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ПОЛИДИСПЕРСНОГО ВЯЖУЩЕГО С ПОЛИМЕРНО-МИНЕРАЛЬНЫМ МОДИФИКАТОРОМ

3.1 Предпосылки модифицирования тяжелого бетона

Гидротехнический бетон является особым видом специального бетона, обладающим высокими физико-механическими, гидрофизическими показателями, коррозионной стойкостью. Предназначен для строительства сооружений, их элементов, постоянно или периодически контактирующих с водой, а также должен иметь комплекс свойств, которые позволят повысить срок эксплуатации данных конструкций.

Основной задачей, решаемой гидротехническими бетонами, является обеспечение высокой водонепроницаемости конструкций, их высокой морозостойкости в условиях попеременного увлажнения и высыхания, а также высокой коррозионной стойкости в водах, имеющих в своём составе огромный спектр химически активных солей, щелочей и электролитов.

Огромный массив данных, наработанных наукой и производством в области гидротехнических бетонов, можно переосмыслить для улучшения свойств бетонных изделий агротехнического комплекса. Традиционно, гидротехнические бетоны имеют более высокие требования к физико-механическим и гидрофизическим характеристикам, поскольку конструкции из них используются при постоянном воздействии значительных нагрузок и высокого давления воды. Поэтому их использование без адаптации к условиям работы мелиоративных сооружений дорого и нерационально.

Для получения эффективного бетона для производства лотков оросительных систем необходимо получить структуру бетона, максимально стойкую к проникновению при атмосферном давлении в неё воды и растворов солей,

применяемых в агропромышленном комплексе. Решить данную задачу возможно за счёт применения комплексного подхода к созданию оптимально плотной структуры цементного камня. Предполагается, что матрица цементного камня может обладать плотной структурой с минимальной пористостью за счёт тонкого подбора гранулометрического состава гидравлического вяжущего вещества, введения водоредуцирующих добавок и использования дисперсного армирования.

Традиционные бетоны для применения в агропромышленном комплексе изготавливаются на основе портландцементных вяжущих (иногда с активными минеральными добавками), крупного заполнителя (гранитного или известнякового щебня, иногда гравия), мелкого заполнителя (речного или карьерного кварцевого песка) и известных со времён Советского Союза недорогих и технологичных суперпластификаторов (С-3 или меламинасульфонатные комплексы). При бетонировании на местах могут быть использованы и добавки, получаемые переработкой продуктов агропромышленной деятельности. В настоящее время увеличивается доля использования для получения таких бетонов современных добавок-модификаторов свойств на основе полимерных соединений [121, 137-139]. Также для повышения их эксплуатационных свойств перспективно применение химико-минеральных модификаторов [140-142].

Таким образом, повышение качества бетона для производства лотков оросительных систем является важным вопросом и требует своего развития при помощи технологического решения, предусматривающего использование в его составе полидисперсного вяжущего совместно с комплексным модификатором (суперпластификатор+полимер+микрокремнезем).

Для доказательства сформулированной гипотезы были выбраны компоненты, функции и свойства которых представлены в таблицу 3.1. Указанные компоненты были использованы в расчёте и подборе состава тяжёлого бетона и получении экспериментальных образцов изделий на их основе.

Таблица 3.1 – Компоненты, применяемые в работе для проектирования состава тяжелого бетона

| Компонент | Функция (проявление) |
|--|---|
| <p>Полидисперсное вяжущее</p> | <p>Первый уровень – грубая фракция клинкера с удельной поверхностью 150 м²/кг принималась с учетом обеспечения запаса клинкерного фонда, способствующему восстановлению бетона в поздние сроки твердения при его эксплуатации (при значительном появлении дефектов структуры – «эффект самозалечивания»).</p> <p>Второй уровень – тонкая фракция с удельной поверхностью 450 м²/кг принималась с учетом максимального заполнения межчастичных пустот грубодисперсной составляющей, которая должна обеспечить твердение цементной системы на ранней стадии твердения.</p> <p>Для повышения качества цемента, а также возможностью получения высокопрочного бетона с минимальным расходом цемента вводилась третья фракция с удельной поверхностью 300 м²/кг, что является третьим уровнем упаковки дисперсного состава вяжущего вещества.</p> |
| <p>Суперпластификатор Melflux 5581 F</p> | <p>Обладает водоредуцирующим действием (позволяет получать смесь требуемой удобоукладываемости с пониженным расходом воды), обеспечивает уменьшение расслаиваемости бетонной смеси; уменьшает проницаемость, повышает прочность, морозо- и коррозионную стойкость, уменьшает усадку и ползучесть отвердевшего бетона.</p> |

Продолжение таблицы 3.1

| Компонент | Функция (проявление) |
|--|---|
| Водорастворимая полимерная добавка «Полидон-А» | Модифицирование порового пространства цементного камня, для повышения его непроницаемости, морозо- и коррозионной стойкости. |
| Микрокремнезем марки МКУ-95 | Повышение плотности и прочности цементного камня и бетона на его основе; а также стойкости к коррозии I вида (выщелачивания) за счет связывания портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в водонерастворимые низкоосновные гидросиликаты кальция. |
| Базальтовое волокно | Повышение трещиностойкости путем его микроармирования, результатом которого является выравнивание и снижение концентрации напряжений в структуре бетона, в частности в зоне макродефектов |

По результатам предварительной серии экспериментов разработанные составы корректировались для обеспечения низкой пористости всех уровней (и, как следствие, высоких водонепроницаемости, водопоглощения и морозостойкости) при сохранении требуемой прочности бетона.

3.2 Разработка предварительного состава модифицированного тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным полимерным модификатором

Подбор состава тяжелой бетонной смеси выполнялся в соответствии с методическим пособием, «Рекомендации по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов», разработанным НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» [143].

Исходными данными для проектирования состава бетонной смеси являлись условия работы конструкции оросительных систем, требуемые характеристики которых подбирались в соответствии с ГОСТ 24587-81 «Лотки-водоотпускники

железобетонные оросительных систем. Технические условия». Расчётный класс бетона по прочности с учётом коэффициента вариации был принят равным В40 в двадцативосьмисуточном возрасте. При этом, толщина стенок лотка оросительной системы требует, чтобы максимальный размер фракции крупного заполнителя не превышал 15 мм [130]. Для обеспечения требуемой плотности матрицы применялись полифракционные вяжущие вещества, которые в расчёте были охарактеризованы по средней фракции вяжущего. Характеристики цемента для расчёта были приняты согласно п. 2.21 главы 2. Характеристики остальных компонентов также приведены в соответствующих разделах главы 2.

Подбор состава бетонной смеси начинался с определения цементно-водного отношения (Ц/В), непосредственно определяющего пористость цементного камня и плотность матрицы бетона. Поскольку лотки оросительных систем работают в непрерывном контакте с водой и не должны взаимодействовать с нею, то водоцементное отношение должно было быть минимально возможным с обеспечением требуемой реологии бетонной смеси. Ц/В определено по формуле (3.1):

$$(\text{Ц/В}) = \frac{R_6^{\text{пр}} - 0,07 \cdot R_{\text{ц}}^{28} + 13}{0,28 \cdot R_{\text{ц}}^{28} + 13} \quad (3.1)$$

где (Ц/В) – цементно-водное отношение, обеспечивающее среднюю прочность класса бетона после тепловой обработки;

$R_6^{\text{пр}}$ – прочность бетона после тепловой обработки, в возрасте 28 суток, МПа; $R_{\text{ц}}^{28}$ – прочность (активность) цемента в возрасте 28 суток, принимаемая

равной показателю класса, МПа.

Ориентировочный расход воды для расчета и подбора номинального начального состава был принят равным 165 л/м³ по таблице 3.2, так как при применении щебня фракции 5(3)-10 мм он увеличивается на 10-15 л/м³, в итоге был принят равным 180 л/м³.

Таблица 3.2 – Водопопотребность бетонной смеси, л/м³ [143]

| Удобоукладываемость Ж, сек; ОК, см | Без добавок, л/м ³ | С водоредуцирующей добавкой по ГОСТ 24211, л/м ³ | С суперводореду- цирующей добавкой по ГОСТ 24211, л/м ³ |
|---------------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| Ж4 (31–50) | 135 | – | – |
| Ж3 (21–30) | 145 | – | – |
| Ж2 (10–20) | 155 | 145 | 130 |
| Ж1 (5–10) | 170 | 160 | 145 |
| П1 (1–4) | 185 | 165 | 150 |
| П2 (5–9) | 205 | 185 | 165 |
| П3 (10–15) | 215 | 200 | 170 |
| П4 (16–20) | 230 | 210 | 185 |
| П5 (21–25) | 240 | 215 | 190 |

Расход цемента \mathcal{C} , кг, на 1 м³ в начальном составе бетонной смеси рассчитывают по формуле (3.2) [143]:

$$\mathcal{C}_3 = \mathcal{C}/V \cdot V \quad (3.2)$$

где \mathcal{C}/V – цементно-водное отношение;

V – расход воды, л.

Абсолютный объем заполнителей, V_3 , л, рассчитывается по формуле (3.3) [143]:

$$V_3 = 1000 - V/\rho_v - \mathcal{C}/\rho_c \quad (3.3)$$

где ρ_c – истинная плотность цемента, кг/л;

ρ_v – плотность воды, принимаемая равной $\rho_v = 1$ кг/л.

Количество мелкого заполнителя (песка) рассчитывают по формуле (3.4) [143]:

$$\Pi = V_3 \cdot r \cdot \rho_n \quad (3.4)$$

где Π – расход песка, кг/м³;

r – доля песка в смеси заполнителей;

ρ_n – истинная плотность зерен песка, кг/л.

Долю песка в начальном составе в зависимости от расхода цемента и наибольшей крупности заполнителя принимают по таблице 3.3 [143].

Таблица 3.3 – Доля песка в смеси заполнителей

| Расход цемента, кг/м ³ | Наибольшая крупность щебня, мм | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|------|------|
| | 10 | 20 | 40 |
| 200 | 0,54 | 0,51 | 0,48 |
| 300 | 0,51 | 0,48 | 0,45 |
| 400 | 0,48 | 0,45 | 0,42 |
| 500 | 0,45 | 0,42 | 0,39 |

Количество крупного заполнителя рассчитывают по формуле (3.5) [143]:

$$\text{Щ} = V_3 \cdot (1 - r) \cdot \rho_{\text{щ}} \quad (3.5)$$

где Щ – расход крупного заполнителя, кг/м³;

$\rho_{\text{щ}}$ – средняя плотность зерен щебня, кг/л.

Оптимальное количество добавок, вводимых в бетонную смесь (Д, кг/м³), определяют по ГОСТ [51].

Таблица 3.4 – Расчетный состав тяжелой бетонной смеси

| № п/п | Материалы бетонной смеси | Состав и расход на 1 м ³ смеси, кг/м ³ |
|----------|--|---|
| | | Контрольный (заводской) |
| 1 | ЦЕМ I 42,5Н | 362 |
| 2 | Суперпластификатор Melflux 5581 F (0,3% от массы цемента) | 1,09 |
| 3 | Вода затворения | 180 |
| 4 | Гранитный щебень фр.5-20 мм | 962 |
| 5 | Песок $M_k=2,5$ | 895 |
| 6 | В/Ц | 0,5 |
| 7 | Средняя плотность, кг/м ³ | 2400 |

На следующем этапе решалась задача оптимизации состава модифицированного тяжелого бетона с использованием метода математического планирования эксперимента и расчетно-графических комплексов Matlab R2015a и Polyspace R2020a.

3.3 Определение оптимального состава цементного вяжущего различной дисперсности с применением программно-расчетного комплекса на основе метода «Drop and Roll»

Проблема подбора гранулометрического состава вяжущих композиций, модифицированных минеральными добавками, является одной из задач решение которой позволяет одновременно повысить эффективность, надежность и качество минеральных вяжущих.

С начала зарождения теорий структурообразования вяжущих композиций и до настоящего времени не прекращаются попытки получения фундаментальных закономерностей, связывающих свойства исходных веществ, их содержание в смеси с характеристиками синтезируемого материала. Установление подобных закономерностей [44] могло бы позволить управлять свойствами материалов через управление составом и характеристиками исходных веществ.

Важную роль при решении таких задач в настоящее время играют прикладные программные продукты, способные решать оптимизационные задачи в области строительного материаловедения с получением аналитических зависимостей, связывающих, например, гранулометрический состав исходных материалов со структурой и свойствами проектируемой композиции.

В целях получения сырьевых смесей оптимального зернового состава на основе цементных порошков различной дисперсности и минеральных наполнителей исследовались топологические (геометрия) характеристики получаемых композиций с применением программно-расчетного комплекса, разработанного в ТвГТУ [118].

В основу расчета плотности упаковки частиц в составе композиций заложена известная методика с использованием следующего уравнения [44]:

$$\bar{\rho}_\epsilon = n \frac{V_i}{V_{\text{box}}}, \quad (3.6)$$

где V_i – объем частицы,

n – число частиц,

V_{box} – объём ячейки [144].

Методика предлагается для расчета моно- и полидисперсных гранулометрических составов порошков.

Наибольшая плотность упаковки частиц в объеме, как известно, определена Томасом С. Хейлзом на основе гипотезы Кеплера. Установлено, что плотность упаковки не может превысить величину 0,74. В тоже время эмпирическим путем выявлено, что при засыпке частиц в виде сфер в расчетную ячейку они спонтанным образом располагаются беспорядочно. При этом величины плотности упаковки не превышает значений в диапазоне $0,555 \div 0,64$ [144].

В настоящее время исследователями рассматриваются различные упаковки, которые формируются, например, без учета силы тяжести, или временные упаковки, формирующиеся при встряхивании, для такого случая наибольшая плотность варьируется в пределах $0,58 \div 0,61$. Рассматриваются упаковки, формирующиеся при постукивании в момент засыпки (тогда плотность упаковки достигает значений $0,61 \div 0,64$), и другие [145].

Не менее важным параметром, используемым в данном исследовании с позиций топологии является координационное число. Традиционно под координационным числом понималось число сфер, расположенных таким образом, чтобы они все касались одной центральной сферы.

Однако на данный момент исследователи различают несколько понятий координационного числа [144,145] – число Ньютона, локальное, среднее, эффективное и другие понятия координационного числа.

Например, для случая прямого контакта между сферами используют понятие «числа Ньютона». А при учете сфер, принадлежащих ко второй координационной сфере, используют понятие «локальное координационное число» [146].

Если учитываются сферы, находящиеся вблизи других упакованных сфер, то используют понятие «среднего координационного числа» и т.д.

Хотя многие исследования посвящены координационному числу, его аналитическое определение остается труднодостижимым. Сложность проблемы

заключается в том, что координационное число, хотя и простое по своему определению, неизбежно является неопределенной величиной.

В расчетах учитывается, что если две сферы радиуса r_1 и r_2 находятся рядом, то их касание может быть выражено, как [146]:

$$d = r_1 + r_2 \quad (3.7)$$

где d – расстояние между центрами двух сфер.

Из этого следует, что две сферы могут находиться сколь угодно близко (d немного больше, чем $r_1 + r_2$), фактически не контактируя друг с другом. Известно, что проблема оценки контакта неизбежно встает в экспериментальных исследованиях, что обусловлено техническими приближениями (d невозможно точно измерить). Тогда как при численном моделировании такой проблемы не возникает, поскольку в этом случае положение и размер сфер точно известны.

Но надо отметить, что на результаты, как и в случае измерения плотности упаковки, влияет эффект стенки [147]. По этой причине всегда отмечается различие между экспериментами и моделированием.

В исследованиях производили расчеты плотности упаковок для системы полидисперсных порошков цементного вяжущего различной тонкости помола (дисперсности).

Исходные данные для расчета топологических характеристик приведены в таблицах 3.5, 3.6, 3.6.

В таблице 3.5 приведены исходные данные для расчета плотности упаковок.

В таблице 3.6 представлены размеры сфер, принятые в качестве исходных данных для моделирования.

В качестве характеристического размера каждого порошка (каждой фракции) принят центр соответствующего кумулятивного распределения.

Таблица 3.5 – Исходные данные для расчета плотности упаковок

| № | Образец (состав) | | Прочность бетона на сжатие | |
|---|--|-----------|----------------------------|------|
| | | | Мпа, в возрасте, сут. | |
| | 7 | 28 | | |
| | Удельная поверхность фракции, см ² /г | Состав, % | | |
| 1 | Контрольный портландцемент ЦЕМ 42,5 Н | | 28,4 | 43,5 |

Продолжение таблицы 3.5

| № | Образец (состав) | | | | | | Прочность бетона на сжатие | |
|----|--|------|------|-----------|-----|-----|----------------------------|------|
| | | | | | | | Мпа, в возрасте, сут. | |
| | Удельная поверхность фракции, см ² /г | | | Состав, % | | | 7 | 28 |
| 2 | 1500 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 20,3 | 25,2 |
| 3 | 0 | 3000 | 0 | 0 | 100 | 0 | 26,2 | 39,4 |
| 4 | 0 | 0 | 4500 | 0 | 0 | 100 | 38,6 | 49,7 |
| 7 | 1500 | 3000 | 0 | 30 | 70 | 0 | 19,0 | 28,6 |
| 8 | 0 | 3000 | 4500 | 0 | 80 | 20 | 41,2 | 58,5 |
| 9 | 0 | 3000 | 4500 | 0 | 75 | 25 | 47,4 | 60,7 |
| 10 | 0 | 3000 | 4500 | 0 | 70 | 30 | 50,6 | 63,2 |
| 11 | 1500 | 3000 | 4500 | 15 | 80 | 5 | 40,2 | 52,0 |
| 12 | 1500 | 3000 | 4500 | 15 | 75 | 10 | 44,6 | 56,4 |
| 13 | 1500 | 3000 | 4500 | 15 | 70 | 15 | 48,5 | 57,8 |

Таблица 3.6 – Характеристики дисперсности отдельных порошков цементного вяжущего (фракций)

| Фракция | Удельная поверхность, см ² /г | Средний диаметр частиц, мкм |
|---------|--|-----------------------------|
| 1 | 1500 | 12 |
| 2 | 3000 | 6,6 |
| 3 | 4500 | 4,9 |

Исследователи утверждают, чтобы уменьшить влияние упаковки отношение диаметра частицы к размеру упаковки должно быть >20 [147]. Но т.к. расчёт упаковки в 20 диаметров наибольшей сферы займёт очень продолжительное время, будем изучать единичную ячейку, с отношением большего диаметра сферы к стороне 1 к 14.

Наибольший диаметр равен 12, следовательно, размер ячейки будет $168 \times 168 \times 168$. Шаг сетки возьмём равным 5% от диаметра наименьшей сферы, т.е. $D = 0,245$. Параметр $d = 168$, т.к. ищем наиболее плотную упаковку. Упаковка случайная.

Результаты исследуемых полидисперсных порошков цементного вяжущего и проведенных исследований плотности упаковки с применением программно-расчетного комплекса, разработанного в ТвГТУ [118], приведены в таблицах 3.7, 3.8 и на рисунках 3.1-3.4.

Результатом расчета по моделированию упаковки рассмотренных систем дисперсных порошков приведены в таблице 3.7. Плотность упаковки варьируется от 0,539342 до 0,621818.

Таблица 3.7 – Результаты экспериментов

| № | фракция 1, % | фракция 2, % | фракция 3, % | Плотность упаковки |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------------|
| 1 | 0 | 0 | 100 | 0,539342 |
| 2 | 0 | 20 | 80 | 0,567507 |
| 3 | 0 | 40 | 60 | 0,571382 |
| 4 | 0 | 60 | 40 | 0,573431 |
| 5 | 0 | 80 | 20 | 0,569484 |
| 6 | 0 | 100 | 0 | 0,545223 |
| 7 | 0 | 75 | 25 | 0,570658 |
| 8 | 0 | 70 | 30 | 0,572362 |
| 9 | 15 | 80 | 5 | 0,587762 |
| 10 | 15 | 75 | 10 | 0,59083 |
| 11 | 15 | 70 | 15 | 0,592656 |
| 12 | 20 | 0 | 80 | 0,576771 |
| 13 | 20 | 20 | 60 | 0,593538 |
| 14 | 20 | 40 | 40 | 0,598589 |
| 15 | 20 | 60 | 20 | 0,599248 |
| 16 | 20 | 80 | 0 | 0,578784 |
| 17 | 25 | 75 | 0 | 0,580167 |
| 18 | 30 | 70 | 0 | 0,583709 |
| 19 | 40 | 0 | 60 | 0,590956 |
| 20 | 40 | 20 | 40 | 0,611671 |
| 21 | 40 | 40 | 20 | 0,61163 |
| 22 | 40 | 60 | 0 | 0,587126 |
| 23 | 60 | 0 | 40 | 0,607583 |
| 24 | 60 | 20 | 20 | 0,621818 |
| 25 | 60 | 40 | 0 | 0,594757 |
| 26 | 80 | 0 | 20 | 0,617601 |
| 27 | 80 | 20 | 0 | 0,59325 |
| 28 | 100 | 0 | 0 | 0,563098 |

Таблица 3.8 – Соотнесённые экспериментальные данные и результаты эксперимента

| № | Образец (состав) | | | | | | Прочность бетона на сжатие | | Плотность упаковки |
|----|--|------|------|-----------|-----|-----|----------------------------|------|--------------------|
| | | | | | | | МПа, в возрасте, сут. | | |
| | Удельная поверхность фракции, см ² /г | | | Состав, % | | | 7 | 28 | |
| 1 | Контрольный портландцемент ЦЕМ 42,5 Н | | | | | | 28,4 | 43,5 | 0,542214 |
| 2 | 1500 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 20,3 | 25,2 | 0,563098 |
| 3 | 0 | 3000 | 0 | 0 | 100 | 0 | 26,2 | 39,4 | 0,545223 |
| 4 | 0 | 0 | 4500 | 0 | 0 | 100 | 38,6 | 49,7 | 0,539342 |
| 5 | 1500 | 3000 | 0 | 20 | 80 | 0 | 24,1 | 39,6 | 0,578784 |
| 6 | 1500 | 3000 | 0 | 25 | 75 | 0 | 20,7 | 31,3 | 0,580167 |
| 7 | 1500 | 3000 | 0 | 30 | 70 | 0 | 19,0 | 28,6 | 0,583709 |
| 8 | 0 | 3000 | 4500 | 0 | 80 | 20 | 41,2 | 58,5 | 0,569484 |
| 9 | 0 | 3000 | 4500 | 0 | 75 | 25 | 47,4 | 60,7 | 0,570658 |
| 10 | 0 | 3000 | 4500 | 0 | 70 | 30 | 50,6 | 63,2 | 0,572362 |
| 11 | 1500 | 3000 | 4500 | 15 | 80 | 5 | 40,2 | 52,0 | 0,587762 |
| 12 | 1500 | 3000 | 4500 | 15 | 75 | 10 | 44,6 | 56,4 | 0,590834 |
| 13 | 1500 | 3000 | 4500 | 15 | 70 | 15 | 48,5 | 57,8 | 0,592656 |

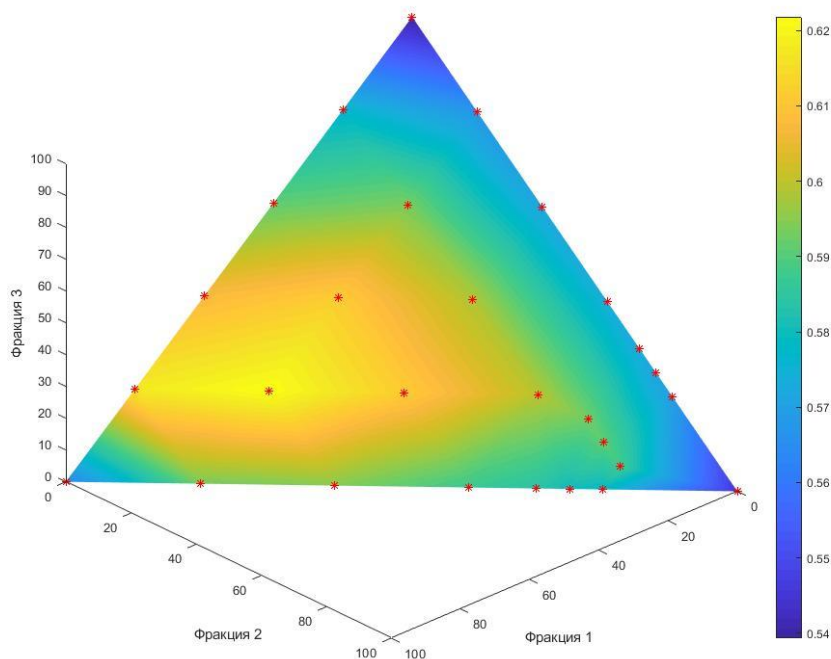


Рисунок 3.1 – Зависимость плотности упаковки от процентного состава смеси

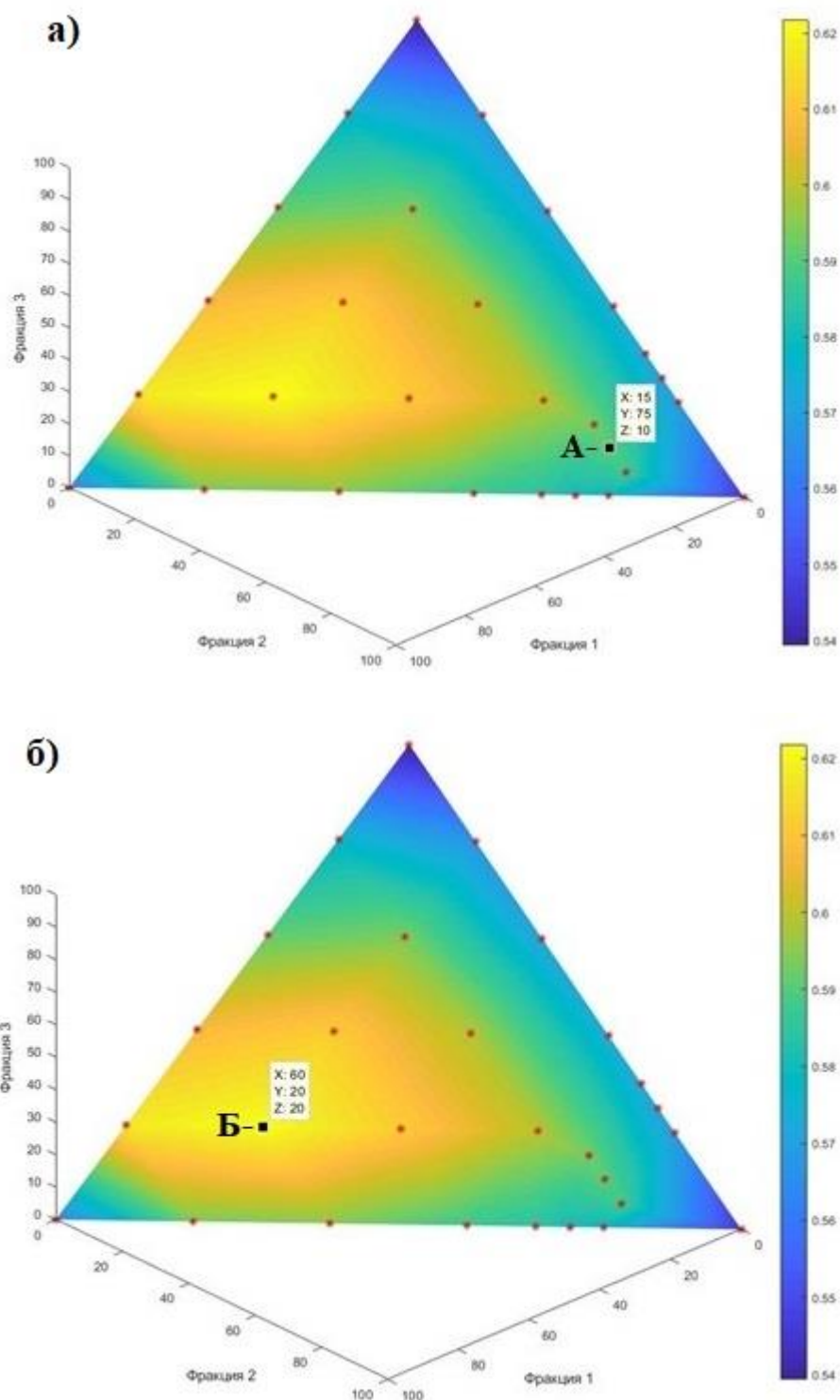


Рисунок 3.2 – Влияние зернового состава вяжущего на плотность упаковки:

а) положение проектируемого состава с плотностью упаковки 0,59083;

б) максимальное значение с плотностью упаковки 0,592656

Анализ данных (рисунок 3.2), показал снижение плотности упаковки в предлагаемом составе на 0,5% (рисунок 3.2 а, точка А) в сравнении с максимальным расчетным значением (рисунок 3.2 б, точка Б). Учитывая факт

повышения энергозатрат при получении тонкодисперсного порошка с удельной поверхностью $450 \text{ м}^2/\text{кг}$, было принято решение взять за оптимальную упаковку состав 12 (таблица 3.8, рисунок 3.2 а, точка А) с соотношением цементных частиц в %: 15 – со средним диаметром $d_{\text{cp}}=12 \text{ мкм}$ и удельной поверхностью $S_{\text{уд}} = 150 \text{ м}^2/\text{кг}$; 75 – $d_{\text{cp}} = 6,6 \text{ мкм}$, $S_{\text{уд}} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$; 10 – $d_{\text{cp}} = 4,9 \text{ мкм}$, $S_{\text{уд}} = 450 \text{ м}^2/\text{кг}$.

При этом отмечалась положительная динамика зависимости прочности от плотности упаковки цементных частиц: оптимальный состав 12 показал прирост прочности в возрасте 7 и 28 сут. на 57 и 29% в сравнении с контрольным составом 1, что составляет 44,6 и 56,4 МПа соответственно.

3.4 Построение ортогонального центрального планирования второго порядка с целью подбора оптимального состава модифицированного тяжелого бетона

Для установления зависимости влияния управляющих фактор на выделенные параметры качества бетона использован метод планирования эксперимента с использованием рототабельного композиционного плана, уравнение в общем виде [121]:

$$\bar{Y}_q = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{\substack{j,u=1 \\ j \neq u}}^k b_{ju} x_j x_u + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 + \dots \quad (3.8)$$

Для проведения эксперимента расход материалов бетонных смесей на 1 м^3 в виде гранитного щебня, песка, воды, суперпластификатора «Melflux 5581 F» установлен постоянным для всех разработанных составов и равным, соответственно, 962 кг, 895 кг, 180 л, 1,09 кг. Входные факторы, влияющие на прочность на сжатие ($R_{\text{сж}}$), условный коэффициент интенсивности напряжений (K_C^*) и водопоглощение (W_m), отображены в таблице 3.9 и представлены в виде:

– x_1 – содержание неионогенного полимера «Полидон-А», C_d , % от массы вяжущего вещества;

– x_2 – содержание базальтового волокна, C_ϕ , % от объема.

Таблица 3.9 – Интервалы и уровни варьирования входных факторов для планирования эксперимента второго порядка

| № | Входные факторы | | | Основные уровни | Интервалы варьирования |
|---|-----------------------------------|-----------------|------------|-----------------|------------------------|
| | Наименование | Натуральный вид | Переменная | | |
| 1 | Содержание неионогенного полимера | C_d | x_1 | 0,2 | 0,1 |
| 2 | Содержание базальтового волокна | C_ϕ | x_2 | 0,7 | 0,15 |

Результаты проведенных испытаний в соответствии с выбранным планом приведены в таблице 3.10. Согласно плану эксперимента, для каждого исследуемого состава подготовлено и испытано по 3 образца, с фиксированием результатов.

Таблица 3.10 – Результаты испытаний модифицированного тяжелого бетона

| № п/п | C_d , % | C_ϕ , % | Факторы в кодированном значении | | Результаты исследований | | |
|-------|-----------|--------------|---------------------------------|--------|-------------------------|---|-----------------|
| | | | x_1 | x_2 | $R_{сж}$, МПа | K_c^* , МПа \times м ^{0,5} | W_m , % масс. |
| 1 | 0,3 | 0,85 | +1 | +1 | 67,1 | 0,0692 | 2,6 |
| 2 | 0,1 | 0,85 | -1 | +1 | 60,0 | 0,0590 | 3,4 |
| 3 | 0,3 | 0,55 | +1 | -1 | 61,2 | 0,0644 | 3,2 |
| 4 | 0,1 | 0,55 | -1 | -1 | 62,7 | 0,0654 | 3,0 |
| 5 | 0,341 | 0,7 | +1,414 | 0 | 65,9 | 0,0686 | 2,8 |
| 6 | 0,059 | 0,7 | -1,414 | 0 | 60,7 | 0,0629 | 3,5 |
| 7 | 0,2 | 0,912 | 0 | +1,414 | 67,2 | 0,0717 | 2,5 |
| 8 | 0,2 | 0,488 | 0 | -1,414 | 63,1 | 0,0652 | 3,0 |
| 9 | 0,2 | 0,7 | 0 | 0 | 77,3 | 0,0742 | 1,9 |

Значения коэффициентов регрессионных уравнений, представленных в таблице 3.11, были получены с использованием формул для расчета коэффициентов ортогонального центрального планирования второго порядка.

Таблица 3.11 – Коэффициенты регрессионных уравнений второго порядка

| Исследуемая характеристика | b_0 | b_1 | b_2 | b_{12} | b_{11} | b_{22} |
|--|--------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Y_1 $R_{сж}$, МПа | 77,30 | 1,619 | 1,125 | 2,150 | -7,369 | -6,444 |
| Y_2 K_c^* , МПа \times м ^{0,5} | 0,0742 | 0,0022 | 0,0010 | 0,0028 | -0,0049 | -0,0035 |
| Y_3 W_m , % масс. | 1,9 | -0,1987 | -0,1134 | -0,250 | 0,65 | 0,45 |

В соответствии с полученными результатами получены следующие уравнение регрессии (3.10; 3.11; 3.12):

$$Y_1 = 77,3 + 1,62x_1 + 1,13x_2 + 2,15x_1x_2 - 7,37x_1^2 - 6,44x_2^2 \quad (3.10)$$

$$Y_2 = 0,074 + 0,002x_1 - 0,11x_2 + 0,003x_1x_2 - 0,005x_1^2 - 0,004x_2^2 \quad (3.11)$$

$$Y_3 = 1,9 - 0,2x_1 - 0,11x_2 - 0,25x_1x_2 + 0,65x_1^2 + 0,45x_2^2 \quad (3.12)$$

При помощи инструментов компьютерной программы Matlab R2015a были получены изображения поверхности выражения целевых функций для регрессионных уравнений (3.10; 3.11; 3.12) и определены значения переменных x_1 и x_2 , при которых искомая функция (y) принимает максимальное или минимальное значение, отображенные на рисунках 3.3; 3.4; 3.5 соответственно.

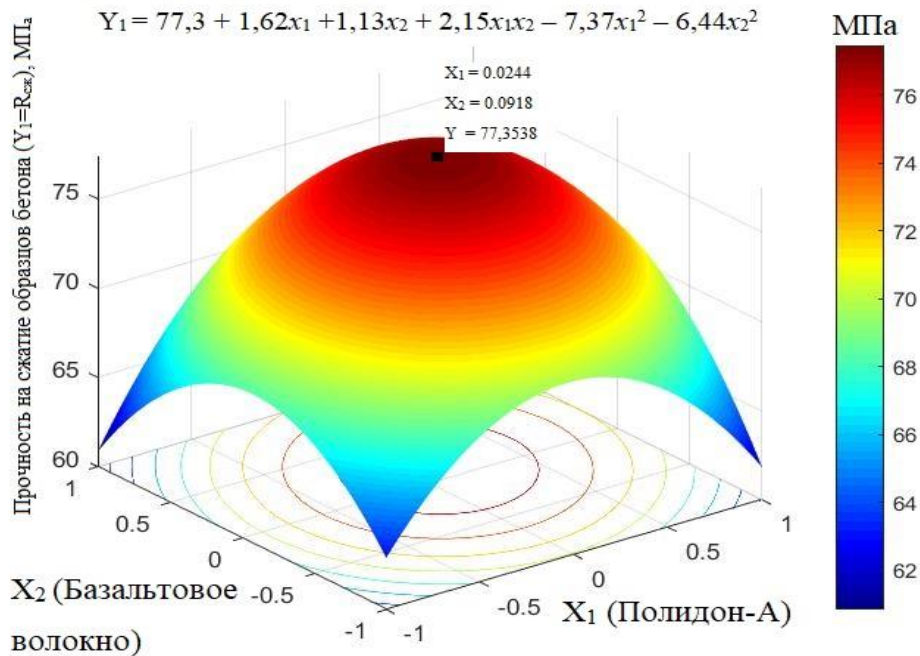


Рисунок 3.3 – Графическое изображение поверхности регрессионного уравнения (3.10) второго порядка

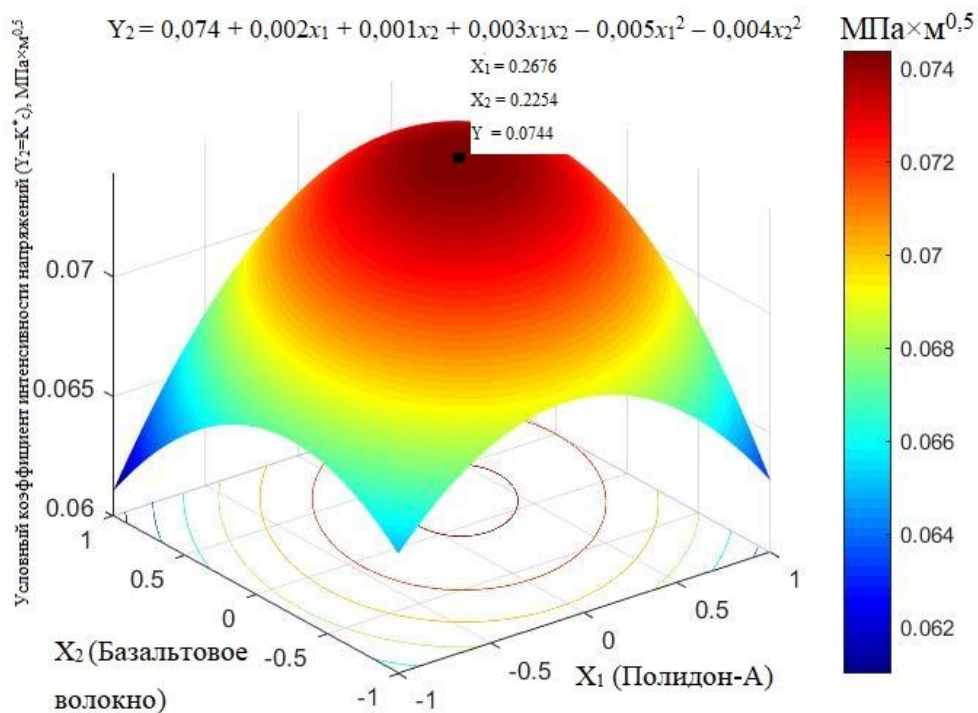


Рисунок 3.4 – Графическое изображение поверхности регрессионного уравнения (3.11) второго порядка

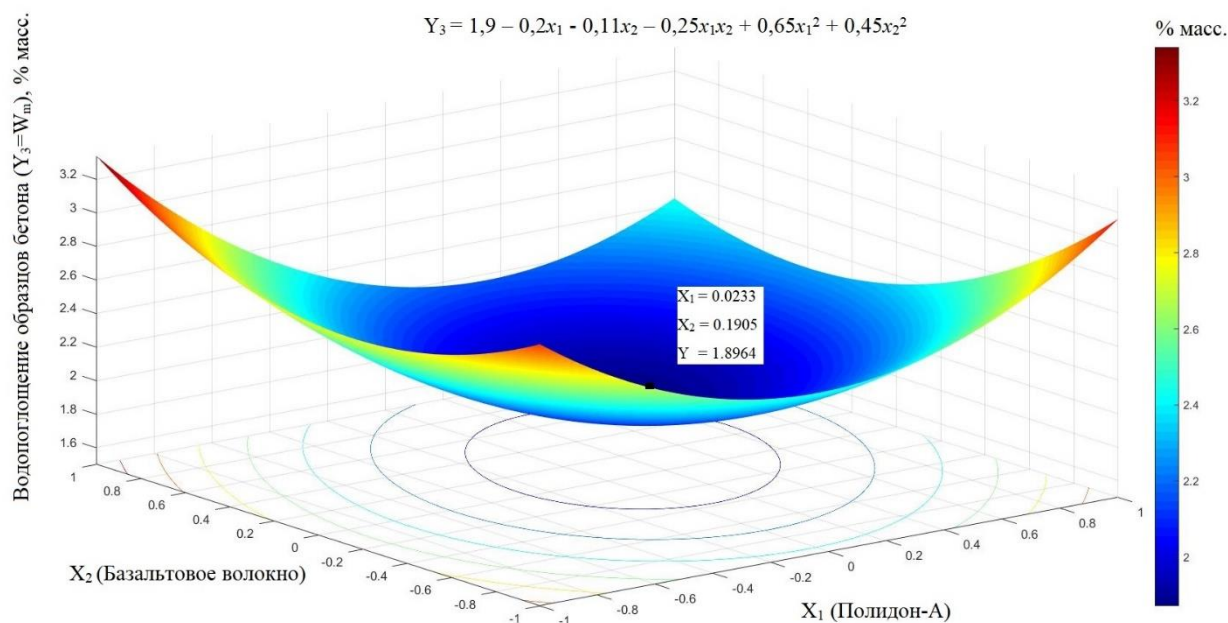


Рисунок 3.5 – Графическое изображение поверхности регрессионного уравнения (3.12) второго порядка

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:

$\text{MAX } Y_1^{\text{max}} = 77,3538$ при $x_1 = 0,0244$, $x_2 = 0,0918$, что в натуральных значениях составляет 0,202% и 0,714%, соответственно.

$\text{MAX } Y_2^{\text{max}} = 0,0744$ при $x_1 = 0,2676$, $x_2 = 0,2254$, что в натуральных значениях составляет 0,227% и 0,734%, соответственно.

$\text{MAX } Y_3^{\text{min}} = 2,352$ 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 3.2–3.4 были определены прочность на сжатие $R_{\text{сж}} = 77,3$ МПа, K_c^* , $\text{МПа} \times \text{м}^{0,5} = 0,074$ МПа, водопоглощение $W_m = 1,9$ %.

Выводы по главе 3

1. С помощью применения программно-расчетного комплекса на основе модифицированного метода «Drop and Roll» определен оптимальный состав цементного вяжущего различной дисперсности с высокой плотностью упаковки: 15% – средний диаметр частиц $d_{\text{ср}} = 12$ мкм с удельной поверхностью $S_{\text{уд}} = 150$ м²/кг; 75% – $d_{\text{ср}} = 6,6$ мкм, $S_{\text{уд}} = 300$ м²/кг; 10% – $d_{\text{ср}} = 4,9$ мкм, $S_{\text{уд}} = 450$ м²/кг. При этом динамика зависимости плотности упаковки от прочности смеси положительная: предел прочности на сжатие в возрасте 7 сут. и 28 сут. нормального твердения составил 44,6 и 56,4 МПа соответственно.

2. Для проектируемого состава бетона предварительно проанализировали каждый компонент комплексного модификатора с учетом его роли в технологическом процессе и воздействии на свойства модифицированной бетонной смеси и отвердевшего бетона.

3. В соответствии с методическим пособием «Рекомендации по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов», разработанным НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» определен контрольный состав тяжелой бетонной смеси.

4. Получены регрессионные уравнения второго порядка (3.10; 3.11; 3.12), 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 добавки Полидон-А) и x_2 (расход базальтового волокна).

5. При помощи компьютерной программы Matlab R2015a установлено максимальное значение целевой функции – условного коэффициента интенсивности напряжений в возрасте 28 суток нормального твердения в регрессионном уравнении второго порядка в зависимости от входных факторов: расход добавки Полидон-А и базальтового волокна в составе смеси тяжелого бетона: $\text{MAX } Y_1^{\text{max}} = 77,3538$ при $x_1 = 0,0244$, $x_2 = 0,0918$, что в натуральных значениях составляет 0,202% и 0,714%, соответственно. $\text{MAX } Y_2^{\text{max}} = 0,0744$ при $x_1 = 0,2676$, $x_2 = 0,2254$, что в натуральных значениях составляет 0,227% и 0,734%, соответственно. $\text{MAX } Y_3^{\text{min}} = 2,352$ 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 3.2-3.4 были определены прочность на сжатие $R_{\text{сж}} = 77,3$ МПа, условный коэффициент интенсивности напряжений $K_c^* = 0,074 \text{ МПа} \times \text{м}^{0,5}$, водопоглощение $W_m = 1,9 \%$.

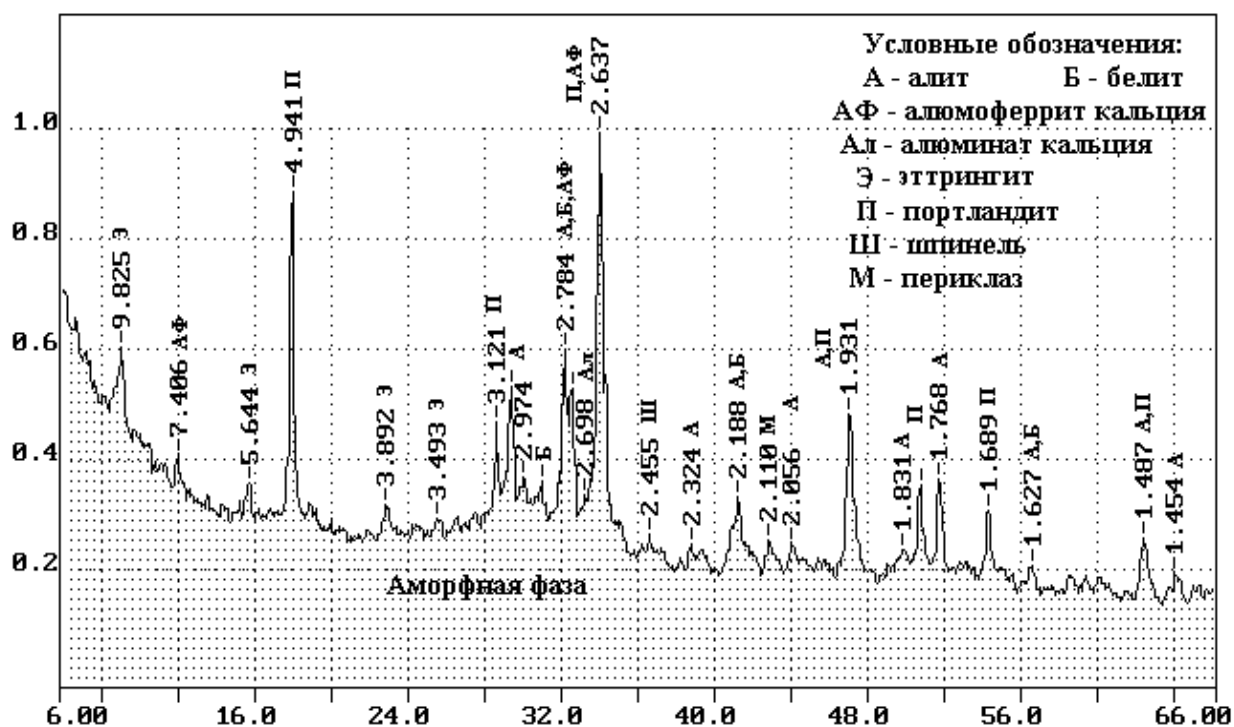
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНОГО МОДИФИКАТОРА НА СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

4.1 Рентгенофазовый и микроструктурный анализы продуктов гидратации цементного камня в присутствии суперпластификатора, полимера и микрокремнезема

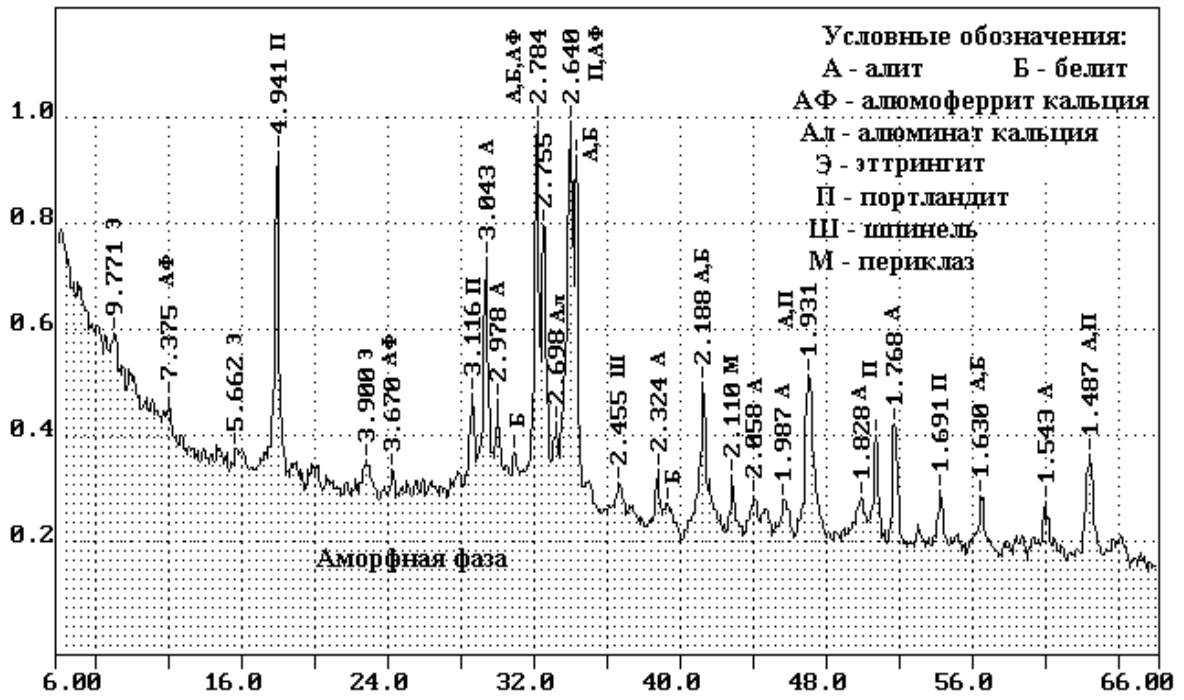
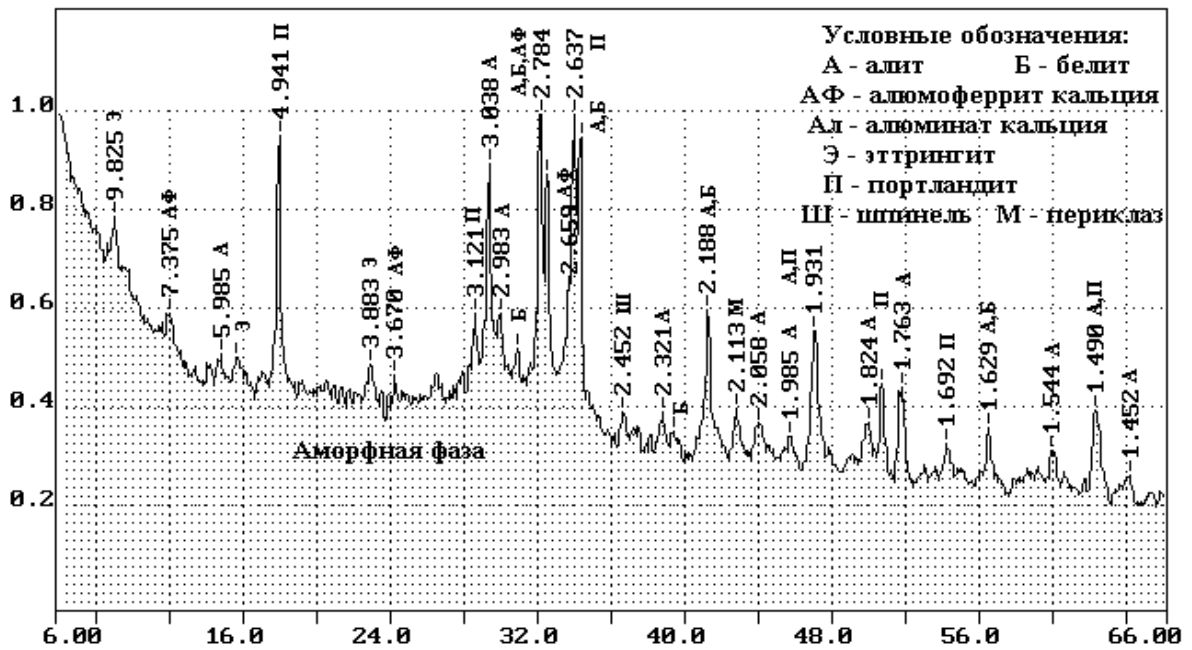
Метод рентгенофазового анализа (РФА), описанный в главе 2 п. 2.1.1, применялся для оценки влияния комплексного модификатора (Melflux5581F+Полидон-А+микрокремнезем). Также необходимо отметить, что на основании анализа литературных данных [148-150], для повышения коррозионной стойкости цементного камня часть вяжущего была модифицирована активной минеральной добавкой микрокремнеземом в количестве 15%. Дозировка микрокремнезема была определена на основании практического опыта и данных работ [28, 29, 151]. Исследование проводилось на образцах составов модифицированного цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения, представленных в таблице 4.1. Таблица 4.1. Составы исследуемых образцов цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения, изготовленных из цементного теста нормальной плотности

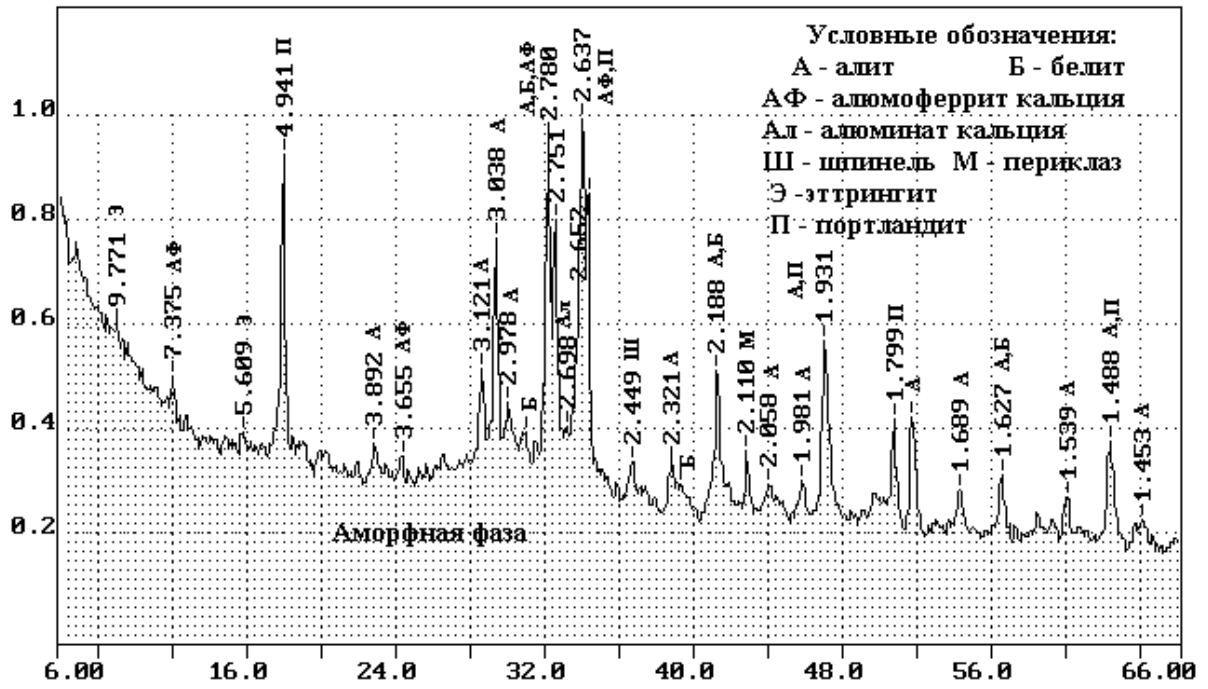
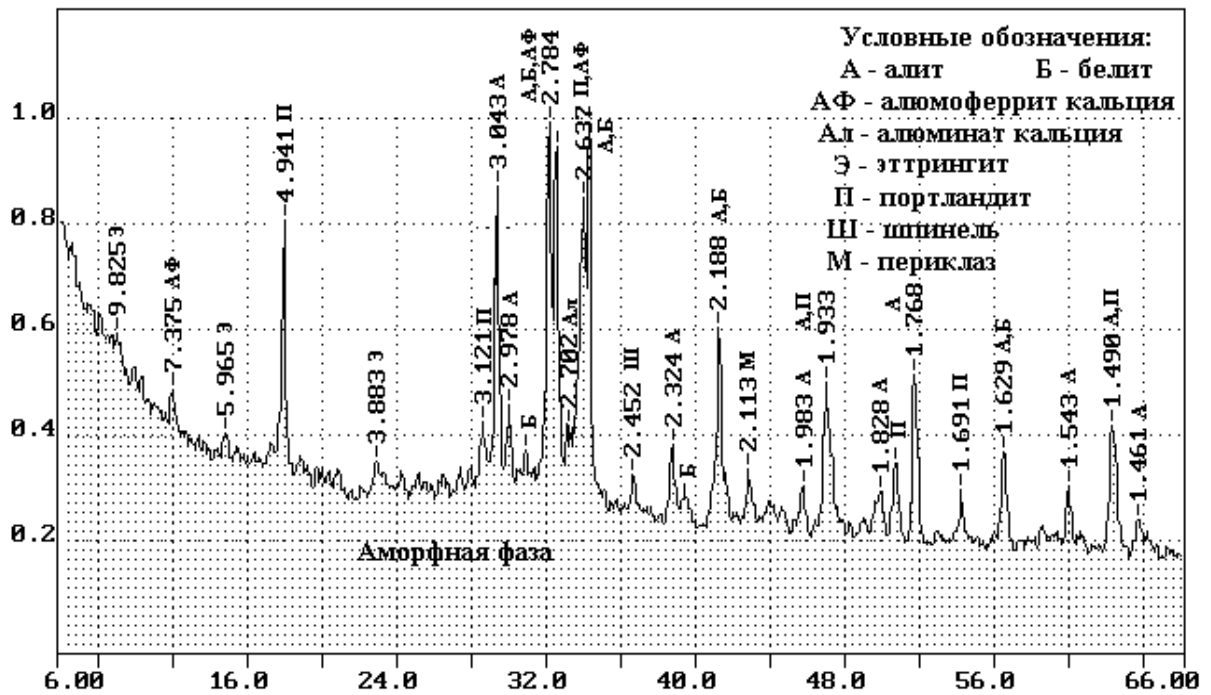
| Материалы | Расход материалов для получения цементного теста нормальной плотности, г | | | | | |
|---|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ЦЕМ I 42,5 Н (завод.) | 400 | - | - | - | - | - |
| Полидис. вяжущее ПВ (контр.) фр. м ² /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 нач. схв. / кон. схв. | <u>2-55</u> 8-20 | <u>1-32</u> 6-15 | <u>2-05</u> 7-10 | <u>2-15</u> 7-25 | <u>2-10</u> 7-20 | <u>2-20</u> 7-30 |
| R _{сж} 3 сут., МПа | 18,4 | 23,2 | 24,8 | 24,0 | 25,8 | 26,5 |
| R _{сж} 28 сут., МПа | 43,5 | 52,4 | 60,8 | 59,2 | 65,5 | 82,5 |

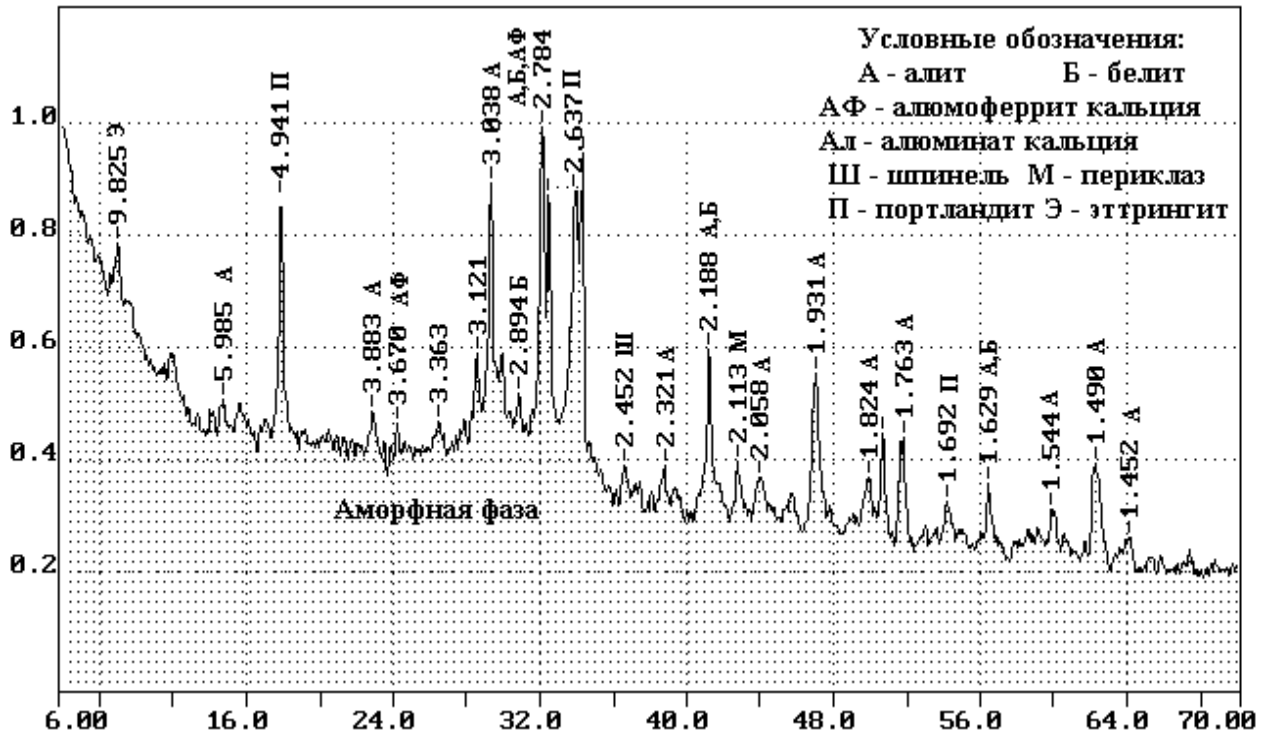
Анализ данных таблицы 4.1 показал, что в составе 2 снизилось В/Ц на 13,3% и сократились сроки схватывания; прочность на сжатие в возрасте 3 и 28 сут. увеличились на 26,1 и 20,5% в сравнении с составом 1. При добавлении к ПВ Melflux 5581F (состав 3) снизилось В/Ц на 30,8%; при этом сроки схватывания увеличились, 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 повысилась 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. На рисунке 4.1 приведен рентгенофазовый анализ гидратированных образцов цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения.



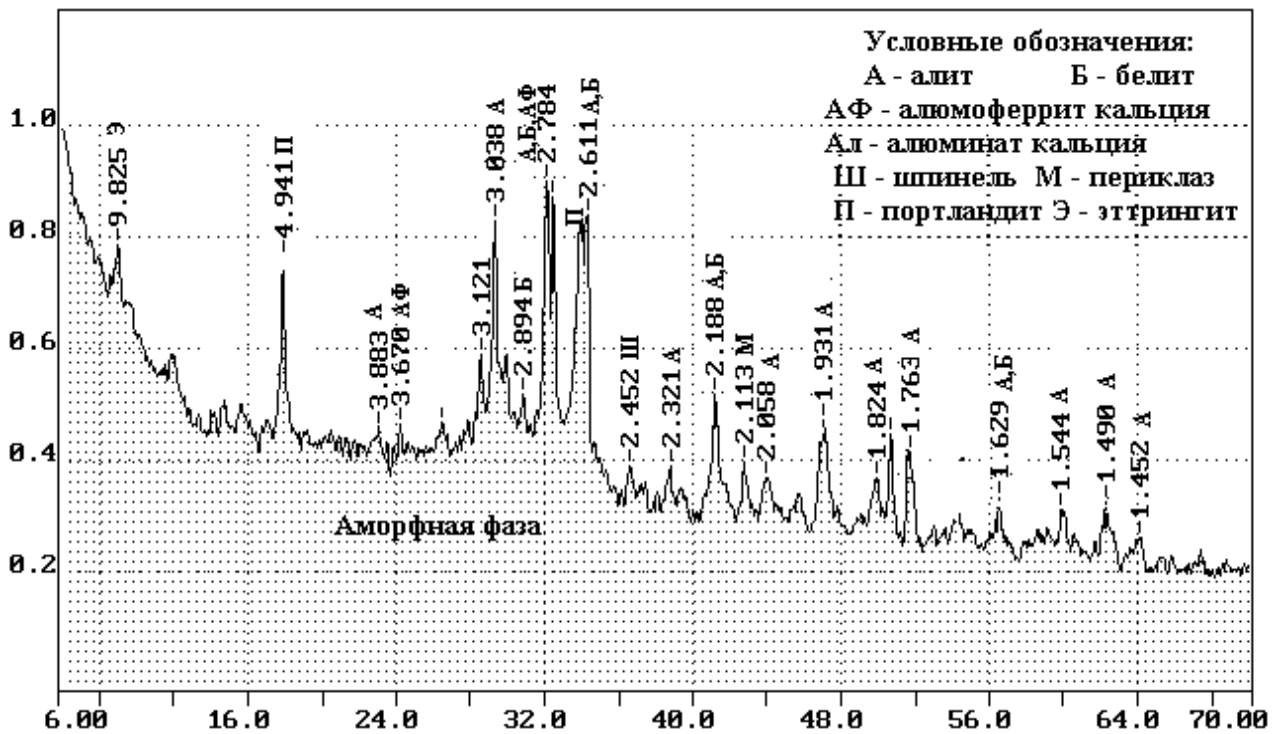
а) ЦЕМ I 42,5 Н;

б) (контрольный) – ПВ+CaSO₄•2H₂O;в) ПВ+CaSO₄•2H₂O+Melflux;

г) PV+CaSO₄•2H₂O+Полидон-А;д) PV+CaSO₄•2H₂O+Melflux+Полидон-А;



е) ПВ+CaSO₄•2H₂O+Melflux+Полидон-А+МК;



ж) ПВ+CaSO₄•2H₂O+Melflux+Полидон-А+МК через 6 месяцев нормального твердения

Рисунок 4.1 – Рентгенофазовый анализ гидратированных образцов в возрасте 28 суток твердения.

В таблице 4.2 приведен фазовый состав исследуемых образцов цементного

камня в возрасте 28 суток нормального твердения, рассчитанный на основе полученных данных РФА (рисунок 4.1).

Таблица 4.2. Фазовый состав цементного камня в возрасте 28 сут. нормального твердения

| № | Цементный камень | Фазовый состав цементного камня, % | | | | |
|---|---|------------------------------------|--------|-----------|--------------------------|--------------------|
| | | C_3S | C_2S | Этtringит | Портландит $Ca(OH)_2$ | 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 : 150 (15%) + 300(75%) + 450 (10%) + 3% гип. 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+ 0,2 % Полидон-А | 26 | 20 | до 2 | 17,2 | 57 |
| 6 | ПВ + 0,3 % Melflux + 0,2 % Полидон-А + 15 % МК | 25/15* | 21/10* | 1/1* | 13,5/10,4* | 62/82* |

Примечание: * через 6 месяцев нормального твердения

Результаты рентгенофазового анализа (таблица 4.2) показали, что в составе 2 (полидисперсное вяжущее ПВ) увеличивается содержание C_3S и C_2S в сравнении с составом 1 (ЦЕМ I 42,5 Н), а степень гидратации снижается с 70 до 52% соответственно. Уменьшение степени гидратации объясняется наличием в составе 2 крупных непрогидратированных до конца 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

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ уменьшилось более чем на 26,6% в сравнении с контрольным. Этот факт является свидетельством протекания пуццолановой реакции, сопровождающейся связыванием портландита микрокремнеземом в менее растворимые и более химически стойкие низкоосновные гидросиликаты кальция. Также необходимо отметить, что в модифицированном составе цементного камня наблюдается повышение аморфной фазы в сравнении с контрольным составом гидратированного цемента. Этот факт объясняется содержанием в предлагаемом составе аморфного микрокремнезема, увеличенного количества не закристаллизованных новообразований орто- и диортогидросиликатов кальция, которые в более поздние сроки полимеризуются с образованием закристаллизованных гидросиликатов тоберморитового ряда (тоберморит, ксонотлит, фошагит, гиллебрандит и т.д.).

Значительное количество непрореагировавших минералов алита и белита (т.е. запаса клинкерного фонда) объясняется низкой реакционной способностью крупных (до 100 мкм) частиц цемента, которые покрываются оболочкой новообразований, замедляющих дальнейшую гидратацию.

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 C_3S с 25 до 15%, C_2S 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.

Проведённые в данной работе исследования микроструктуры цементного камня с помощью растрового электронного микроскопа (рисунок 4.2) показывают, что наличие в составе комплексного модификатора (суперпластификатор+полимер+микрокремнезем, рисунок 4.2, в) позволяет получить плотный цементный камень упорядочной структуры с равномерно

распределенными порами по всему объему при скоплении игольчатых кристаллов этtringита в зоне образования микропор.

Установлено, что при модифицировании цементного камня состава 5 ПВ+(0,3% Melflux+0,2%Полидон-А, таблица 4.2) уменьшаются размеры кристаллов – от 70 до 90 нм (рисунок 4.5, б), и состава 6 ПВ+(0,3% Melflux+ 0,2% Полидон-А+15% МК, таблица 4.2) – от 60 до 75 нм (рисунок 4.2, в), что значительно ниже, чем в контрольном составе 2 (ПВ контрольный, таблица 4.2) – от 100 до 120 нм (рисунок 4.2, а).

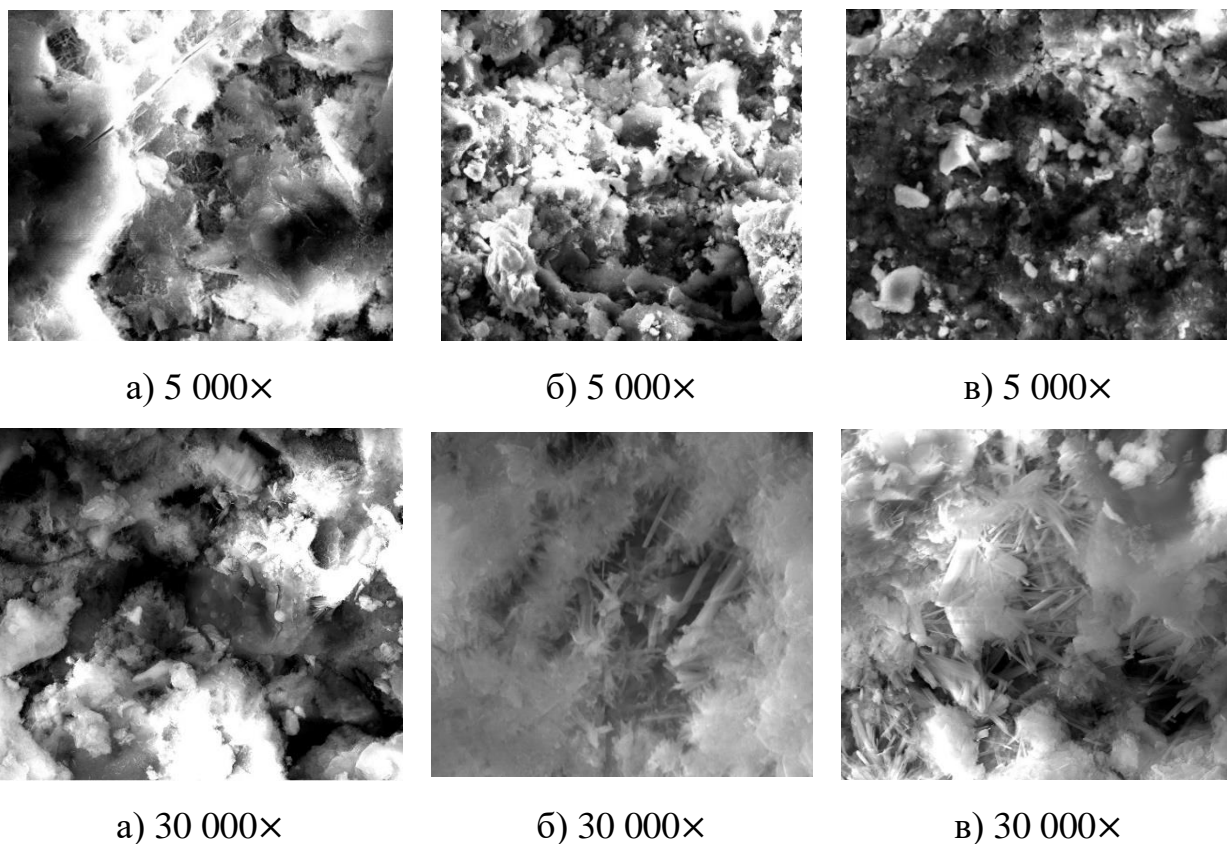


Рисунок 4.2 – Микроструктура цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения :

- 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)

Модифицированный цементный камень состава 6 (см. таблица 4.2) имеет более плотную и однородную мелкопористую структуру с размером микропор от 0,1 до 0,6 мкм (рисунок 4.2, в); в составе 5 (таблица 4.2) основной диапазон от 0,5

до 2 мкм (рисунок 4.2, б); в контрольном образце составе 2 (таблица 4.2) – от 1 до 5 мкм (рисунок 4.2, 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. Полученные данные согласуются с литературными данными и результатами предыдущих научных работ [152-155].

Результаты исследований модифицированного цементного камня легли в основу разработки состава тяжелого бетона для гидромелиоративного строительства с заданным комплексом эксплуатационных свойств.

4.2 Исследуемые составы модифицированного тяжелого бетона с учетом расхода и подбора сырьевых материалов

Задача повышения свойств тяжелого бетона решалась путем уплотнения его структуры за счет применения трёхуровневого полидисперсного клинкерного компонента совместно с комплексным модификатором (Melflux+Полидон-А+микрокремнезем). Для повышения коррозионной стойкости в состав бетонной смеси вводили активную минеральную добавку в виде реакционноспособного микрокремнезема, а для нивелирования действия изгибающих моментов – базальтовое волокно.

Составы тяжелого бетона, рассчитанные по методике, приведенной в п. 3.2, представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Исследуемые составы модифицированного тяжелого бетона

| Материалы | Состав и расход на 1 м ³ бетонной смеси, кг/м ³ | | | | | |
|--------------------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Состав 1 контр. | Состав 2 | Состав 3 | Состав 4 | Состав 5 | Состав 6 |
| ЦЕМ I 42,5Н | 362 | - | - | - | - | - |
| Полидисперсное вяжущее | - | 362 | 362 | 362 | 308 | 308 |
| Микрокремнезём МКУ-95 (15%) | - | - | - | - | 54 | 54 |

Продолжение таблицы 4.3

| Материалы | Состав и расход на 1 м ³ бетонной смеси, кг/м ³ | | | | | |
|--|---|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Состав 1 контр. | Состав 2 | Состав 3 | Состав 4 | Состав 5 | Состав 6 |
| Вода | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| Гранитный щебень | 962 | 962 | 962 | 962 | 962 | 962 |
| Песок | 895 | 895 | 895 | 895 | 895 | 895 |
| Суперпластификатор «Melflux 5581 F» (0,3%) | 1,09 | 1,09 | - | 1,09 | 1,09 | 1,09 |
| Полидон-А (0,2%) | - | - | 0,72 | 0,72 | 0,72 | 0,72 |
| Базальтовое волокно (БВ) (0,7%) | - | - | - | - | - | 2,16 |
| В/Т (Ц+МК) | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |

Оптимальное содержание комплексной добавки (0,3% Melflux+0,2% Полидон-А+15%МК) определяли путем испытания на прочность образцов-кубов. Представленные составы в таблице 4.3 применялись в дальнейших исследованиях физико-механических, гидрофизических характеристик и коррозионной стойкости.

4.3 Технологические свойства разработанных бетонных смесей

Технологический процесс формирования железобетонных лотков оросительных систем включает в себя основные этапы укладки бетонной смеси в опалубку, в которой предварительно установлен арматурный каркас. Для качественного прилегания бетонной смеси к стенкам опалубки и арматуре и, как следствие, формированию плотного сцепления арматуры и бетона и созданию высокой поверхностной плотности и неразрывности поверхности лотка, требуется обеспечить высокую удобоукладываемость бетонной смеси при невысоких водоцементных отношениях. В разработанных составах подобная удобоукладываемость обеспечивается комплексной работой двух добавок совместно с оптимальной реологией цементного теста на основе полифракционного вяжущего.

Для обеспечения получения тела лотка без каверн и дефектов поверхности совместно с вышеуказанными факторами, была выбрана бетонная смесь с

показателем подвижности П2 (осадка конуса – около 5 см). Назначенный показатель подвижности смеси был использован при подборе состава бетонной смеси (см. п. 3.2).

Поскольку в технологии предусматривается вибрационное воздействие на уложенную бетонную смесь, показатели водо- и раствоороотделения не должны превышать нормативные. Реологические свойства бетонной смеси должны также быть подобраны таким образом, чтобы не допустить расслоения бетонной смеси или оседания крупного заполнителя. Результаты реологических свойств смеси (В/Ц = 0,5) приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Подвижность, водоотделение, раствоороотделение и средняя плотность

| Маркировка | Исследуемый показатель | | | |
|---|-----------------------------|--|---------------------|-------------------------------|
| | Подвижность Марка/ОК, см | Средняя плотность, кг/м ³ | Водоотделение, % | Раствороотде- ление, Пр, % |
| Состав 1 контрольный (заводской) ПЦ+0,3%Melflux | П2/5 | 2400 | 0,45 | 2,8 |
| Состав 2 ПВ+0,3%Melflux | П2/6 | 2400 | 0,31 | 1,44 |
| Состав 3 ПВ +0,2% Полидон-А | П2/5 | 2400 | 0,24 | 1,37 |
| Состав 4 ПВ + (0,3%Melflux + 0,2%Полидон-А) | П2/6 | 2401 | 0,20 | 1,34 |
| Состав 5 ПВ + (0,3%Melflux+ 0,2%Полидон- А+15%МК) | П2/7 | 2401 | 0,19 | 1,32 |
| Состав 6 ПВ + (0,3%Melflux+ 0,2%Полидон- А+15%МК)+0,7%БВ | П2/5 | 2403 | 0,22 | 1,28 |

Анализ результатов таблицы 4.4 показал, что предлагаемый состав 6 на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором совместно с базальтовым волокном ПВ + (0,3%Melflux + 0,2%Полидон-А + 15%МК) + 0,7% БВ существенно снизил показатели водоотделения и раствоороотделения бетонной смеси в сравнении с контрольным (на обычном цементе) – в 2,1 и 2,2 раза

соответственно.

4.4 Физико-механические свойства разработанного модифицированного тяжелого бетона

При эксплуатации железобетонных лотков оросительных систем, исследования и практический опыт показали, что данные конструкции недостаточно долговечны и надежны. Известны многочисленные случаи преждевременного разрушения некоторых элементов, происходящие вследствие попеременного замораживания и оттаивания, коррозии бетона, что приводит к необходимости дополнительного ремонта, и, как следствие, дополнительных затрат.

При эксплуатации железобетонных лотков оросительных систем вышеперечисленные отрицательные воздействия на бетон стали предпосылкой дальнейших исследований, представленных в 4 главе.

4.4.1 Прочность на сжатие

Определение пределов прочности на сжатие производилось по методике, приведенной в главе 2, п. 2.1.4 [156].

Характер разрушения и результаты испытаний модифицированного бетона представлен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты испытаний прочности на сжатие, пористости и модуля упругости модифицированного бетона

| Маркировка | Номер образца | Плотность, кг/м ³ | Прочность на сжатие, МПа | | Пористость, % | Модуль упругости, МПа, E _b |
|---|---------------|------------------------------|--------------------------|--------------------|---------------|---------------------------------------|
| | | | R _{сж} | R _{сж,ср} | | |
| Состав 1 контр. заводской ПЦ+ 0,3%Melflux | 1 | 2401 | 48,5 | 50,1 | 14,52 | 25587 |
| | 2 | 2400 | 51,7 | | | |
| | 3 | 2402 | 50,1 | | | |
| Состав 2 ПВ+0,3%Melflux | 1 | 2408 | 61,8 | 62,0 | 11,67 | 31235 |
| | 2 | 2408 | 62,3 | | | |
| | 3 | 2409 | 61,9 | | | |

Продолжение таблицы 4.5

| Маркировка | Номер образца | Плотность, кг/м ³ | Прочность на сжатие, МПа | | Пористость, % | Модуль упругости, МПа, E _b |
|---|---------------|------------------------------|--------------------------|--------------------|---------------|---------------------------------------|
| | | | R _{сж} | R _{сж,ср} | | |
| Состав 3 ПВ +0,2% Полидон-А | 1 | 2406 | 60,4 | 59,8 | 10,54 | 32119 |
| | 2 | 2405 | 59,4 | | | |
| | 3 | 2406 | 59,6 | | | |
| Состав 4 ПВ + 0,3%Melflux + 0,2%Полидон-А | 1 | 2412 | 62,5 | 62,1 | 10,12 | 36879 |
| | 2 | 2410 | 62,0 | | | |
| | 3 | 2412 | 61,8 | | | |
| Состав 5 ПВ + (0,3%Melflux + 0,2%Полидон-А + 15%МК) | 1 | 2420 | 74,0 | 74,1 | 9,2 | 39876 |
| | 2 | 2419 | 74,1 | | | |
| | 3 | 2420 | 74,2 | | | |
| Состав 6 ПВ + (0,3%Melflux + 0,2%Полидон- А+15%МК) + 0,7% БВ | 1 | 2418 | 77,9 | 77,3 | 8,6 | 42259 |

Анализ результатов определения прочности разработанных бетонных смесей (таблица 4.5 и рисунок 4.3), показал, что:

- предел прочности на сжатие в составе 5, состоящим из ПВ+(0,3%Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК) повышается на 47,9% относительно контрольного состава 1 (ПЦ+0,3%Melflux) и на 19,5% относительно состава 2 (ПВ+0,3%Melflux), что составляет в абсолютном выражении на 24 и 12 МПа соответственно.

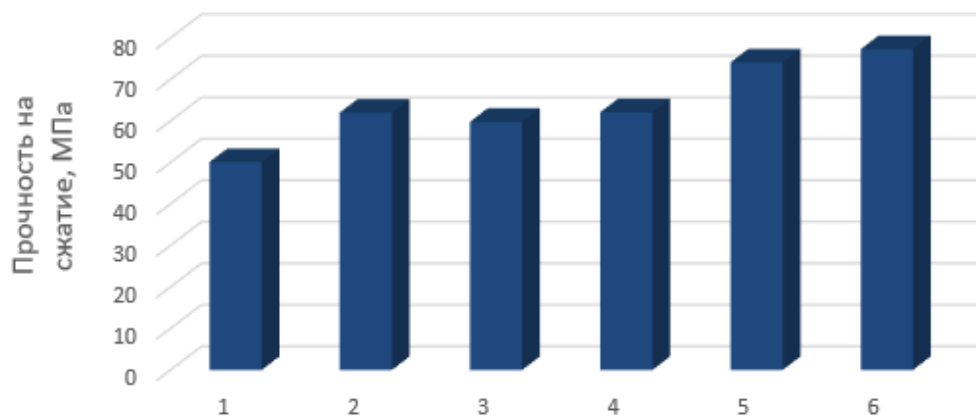


Рисунок 4.3 – Прочность на сжатие бетона

Составы: 1 – контрольный; 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%Мelflux+0,2%Полидон-А+15%МК)+0,7%БВ

При введении в бетонную смесь комплексного модификатора ПВ+(0,3%Мelflux+0,2%Полидон-А+15%МК) процессы гидролиза и гидратации цементных частиц проходят интенсивнее с образование дополнительных центров кристаллизации, что подтверждается проведенными исследованиями рентгенофазовым и микроструктурным анализами цементного камня п. 4.1.

Определено, при добавлении в предлагаемый 6 состав базальтового микроармирующего волокна с концентрацией фибры - 0,7% от массы вяжущего наблюдается незначительное увеличение прочности на 4,3% по отношению к составу 5 (без фибры). Также необходимо отметить, что при повышении оптимального содержания волокон наблюдается их комкование, что негативно влияет на прочность бетона.

Полученные результаты согласуется с зависимостями (3.10-3.12), представленными в главе 3, пункт 3.4 и работами [157-161].

4.4.2 Прочность бетона на растяжение при изгибе

Определение пределов прочности на растяжение при изгибе производилось по методике, приведенной в главе 2, п. 2.1.4. Характер разрушения образцов представлен на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Нагружение образца-призмы до разрушения

Результаты испытаний прочности бетона на растяжение при изгибе приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты испытаний бетона на растяжение при изгибе

| Маркировка | Номер образца | Масса, г | Плотность, кг/м ³ | | Прочность на растяжение при изгибе, МПа | |
|--|---------------|----------|------------------------------|-------------|---|----------------|
| | | | ρ | ρ_{cp} | R_{tb} | $R_{tb} (cp.)$ |
| Состав 1 контрольный заводской ПЦ+ 0,3%Melflux | 1 | 3346,2 | 2401 | 2401 | 5,62 | 5,78 |
| | 2 | 3362,1 | 2400 | | 5,58 | |
| | 3 | 3339,4 | 2402 | | 5,23 | |
| Состав 2 ПВ+0,3%Melflux | 1 | 3342,3 | 2408 | 2408 | 5,72 | 6,54 |
| | 2 | 3351,4 | 2408 | | 5,74 | |
| | 3 | 3345,1 | 2409 | | 5,68 | |
| Состав 3 ПВ + 0,2% Полидон-А | 1 | 3239,6 | 2406 | 2406 | 5,56 | 6,27 |
| | 2 | 3237,4 | 2405 | | 5,6 | |
| | 3 | 3239,2 | 2406 | | 5,54 | |
| Состав 4 ПВ + (0,3%Melflux + 0,2%Полидон-А) | 1 | 3261,4 | 2412 | 2411 | 7,22 | 6,93 |
| | 2 | 3264,2 | 2410 | | 7,23 | |
| | 3 | 3260,6 | 2412 | | 7,25 | |
| Состав 5 ПВ + (0,3%Melflux +0,2%Полидон-А + 15%МК) | 1 | 3266,7 | 2420 | 2420 | 7,42 | 7,73 |
| | 2 | 3268,2 | 2419 | | 7,40 | |
| | 3 | 3266,1 | 2420 | | 7,42 | |
| Состав 6 ПВ + (0,3% Melflux + 0,2%Полидон-А + 15%МК) + 0,7%БВ | 1 | 3264,3 | 2418 | 2417 | 7,48 | 8,62 |
| | 2 | 3263,5 | 2416 | | 7,46 | |
| | 3 | 3264,1 | 2416 | | 7,49 | |

Анализ результатов таблицы 4.6 показал, что максимальный прирост прочности на растяжение при изгибе (R_{tb}) имеют образцы состава 6, содержащий комплексный модификатор (0,3%Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК) и базальтовое волокно 0,7% от массы вяжущего. Показатель прочности повысился на 49,1% по отношению к контрольному (состав 1) и на 11,5% составу 5 (без фибры), что в абсолютном выражении составил 2,84 МПа и 0,89 МПа соответственно.

Полученные положительные результаты исследований на растяжение при изгибе модифицированного бетона с базальтовым волокном согласуются с работами [161-163]. Волокно участвует в процессе образования пространственно-

армированной структуры цементного камня, что повышает трещиностойкость бетона на его основе за счет изменения характера его деформирования, сопровождающегося увеличением доли псевдопластических деформаций при нагружении, что согласуется с данными работы [163].

4.4.3 Трещиностойкость

В процессе эксплуатации лотки оросительных систем должны обеспечивать эффективную подачу воды на дальние расстояния. В настоящее время наиболее распространена конструкция оросительной системы, в которой лотки находятся на возвышении и образуют пространственную конструкцию. Подобная конструкция подвергается различным статическим и динамическим воздействиям от факторов окружающей среды (осадки, ветер, снег, дождь, нагрев от солнца и т.д.). Вследствие этого в конструкции лотка и опоры могут возникать значительные внутренние напряжения. Напряжения в зоне контактов лотка и опоры нивелированы шарнирной конструкцией узла опирания, однако, в пролете в лотке наблюдается возникновение изгибающего момента. Указанные факторы негативно влияют на долговечность конструкции и способствуют появлению и развитию трещин различного размера и формы в теле лотка. В зоне площадки опирания трещины имеют преимущественно диагональную направленность, вследствие касательных напряжений, а в центральной части лотка – преимущественно нормальную направленность вследствие максимального значения изгибающего момента в сечении. При возрастании наполненности лотка водой значения напряжений также возрастают.

Таким образом, для эффективной эксплуатации лотков оросительных систем необходимо обеспечить высокую трещиностойкость бетона. В существующих решениях повышение трещиностойкости обеспечивается в основном за счет применения армирования. Возникающие в лотках трещины традиционно имеют небольшой размер, увеличиваясь впоследствии за счет расширения их по известным физическим процессам, либо за счет

гидрофизических эффектов. Физическо-механический процесс разрушения описан многими исследованиями и заключается в появлении концентратора напряжений в наиболее слабом месте материала, и последующем расширении и удлинении трещины с уменьшением напряжений в ее устье [37]. Гидрофизические процессы включают в себя расклинивающие действия воды и морозное разрушение, описанное ранее. Подобные трещины современные исследователи предлагают ликвидировать за счет применения дисперсного армирования. Дисперсное армирование позволяет получить высокую трещиностойкость бетонной матрицы, но при этом усложняет технологию и удорожает сам лоток. При этом различные материалы дисперсной арматуры могут влиять на коррозионную стойкость лотка оросительных систем, к примеру, широко применяемая в настоящий момент базальтовая арматура или фибра из полимерного волокна не вступают в заметное взаимодействие с проникающей в тело лотка водой, а стальная арматура подвергается коррозии при вымывании из цементного камня легкорастворимых соединений и падение рН показателя с 11-13 до 7 единиц.

Повышение трещиностойкости разработанных составов, по нашим предположениям, может произойти за счет совместной работы всех элементов матрицы бетонного камня, модифицированного добавкой Полидон-А, со стальной арматурой. Применение стальной арматуры является отработанной технологией получения лотков оросительных систем и обеспечивает достаточную пространственную жесткость лотков в конструкции оросительной системы. На микроуровне трещиностойкость матрицы обеспечивается не только введением комплекса добавок, но и продуктами процесса структурообразования тщательно подобранных по гранулометрии зерен вяжущего вещества и дисперсных микронаполнителей. Такое решение позволяет получить равномерную и плотную матрицу цементного камня, в которой также имеются точки релаксации напряжений (гасители трещинообразования) [158,159,162].

Трещиностойкость разработанных составов бетонных смесей оценивалась согласно требованиям ГОСТ [123], описанных в главе 2 п. 2.1.4.

Серия образцов для испытания составляла четыре стандартных образца-призмы размером 70x70x280 мм, в каждом из которых был сделан надрез в середине, глубиной 25 мм и шириной 2 мм.

Испытание состояло из трех циклов, первые два из которых проводились нагружением до 10% от ожидаемой прочности и последующей разгрузки, а третий – до разрушения образца. Нагружение проводилось поступательно, значение разрушающего усилия фиксировалось и было использовано для расчета трещиностойкости (K_C^*) по зависимости (п. 2.1.4) и формуле (2.2). Разрушение образца-призмы представлено на рисунке 4.5.

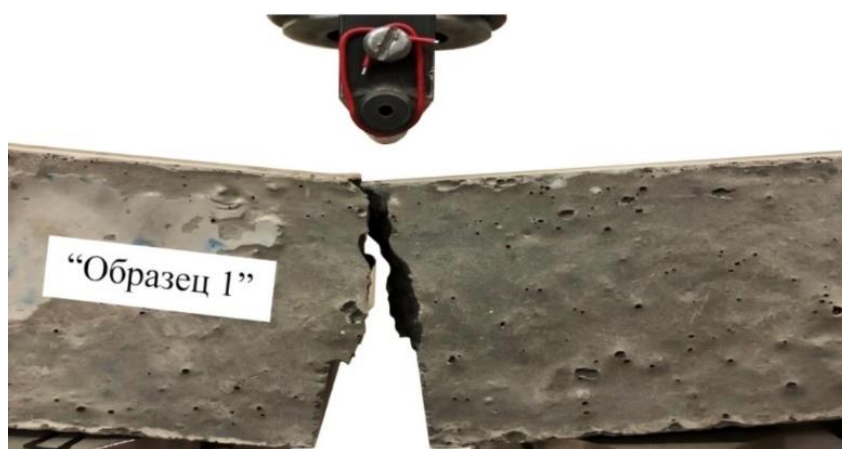


Рисунок 4.5 – Нагружение образца-призмы из тяжелого модифицированного бетона при испытании на трещиностойкость

Характеристики образцов-призм бетона для проведения испытания на трещиностойкость представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.7 – Характеристики образцов-призм бетона для проведения испытания на трещиностойкость

| Маркировка образца | Номер образца | Масса, г | Плотность, кг/м ³ | | Толщина в месте надреза, мм |
|--|---------------|----------|------------------------------|--------------------|-----------------------------|
| | | | ρ | $\rho_{\text{ср}}$ | |
| Состав 1 Контрольный заводской ПЦ+3% Melflux | 1 | 3338,4 | 2401 | 2401 | 45,0 |
| | 2 | 3342,2 | 2400 | | 45,0 |
| | 3 | 3340,6 | 2402 | | 45,0 |
| | 4 | 3345,4 | 2401 | | 45,0 |

Продолжение таблицы 4.7

| Маркировка образца | Номер образца | Масса, г | Плотность, кг/м ³ | | Толщина в месте надреза, мм |
|--|---------------|----------|------------------------------|--------------------|-----------------------------|
| | | | ρ | $\rho_{\text{ср}}$ | |
| Состав 2 ПВ+0,3% Melflux | 5 | 3347,4 | 2408 | 2408 | 45,0 |
| | 6 | 3341,1 | 2408 | | 45,0 |
| | 7 | 3351,2 | 2409 | | 45,0 |
| | 8 | 3342,2 | 2408 | | 45,0 |
| Состав 3 ПВ + 0,2%Полидон-А | 9 | 3238,5 | 2406 | 2406 | 45,0 |
| | 10 | 3237,4 | 2405 | | 45,0 |
| | 11 | 3239,1 | 2406 | | 45,0 |
| | 12 | 3239,6 | 2406 | | 45,0 |
| Состав 4 ПВ + (0,3% Melflux + 0,2%Полидон-А) | 13 | 3262,4 | 2412 | 2411 | 45,0 |
| | 14 | 3260,7 | 2411 | | 45,0 |
| | 15 | 3264,8 | 2412 | | 45,0 |
| | 16 | 3262,2 | 2410 | | 45,0 |
| Состав 5 ПВ + (0,3% Melflux + 0,2%Полидон-А + 15%МК) | 17 | 3266,5 | 2420 | 2420 | 45,0 |
| | 18 | 3268,2 | 2419 | | 45,0 |
| | 19 | 3264,4 | 2420 | | 45,0 |
| | 20 | 3266,2 | 2420 | | 45,0 |
| Состав 6 ПВ +(0,3% Melflux+ 0,2%Полидон-А +15% МК) + 0,7%БВ | 21 | 3262,4 | 2418 | 2417 | 45,0 |
| | 22 | 3264,1 | 2416 | | 45,0 |
| | 23 | 3263,1 | 2417 | | 45,0 |
| | 24 | 3264,2 | 2416 | | 45,0 |

Значения критических нагрузок при изгибающем воздействии, соответствующих внутренних напряжений и условный коэффициент интенсивности напряжений (УКИН) K_c^* представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты испытаний образцов-призм при неравновесных нагружениях и условный коэффициент интенсивности напряжений

| Маркировка образца | Показатель | | |
|--|--------------------------|--------------------|--|
| | Нагрузка F_c^* , кН | Напряжение, МПа | УКИН, K_c^* , МПа \times м ^{0,5} |
| Состав 1 Контрольный заводской ПЦ+0,3% Melflux | 2,083 | 5,971 | 0,052638 |
| Состав 2 ПВ+0,3%+Melflux | 2,192 | 6,295 | 0,055393 |
| Состав 3 ПВ + 0,2%Полидон-А | 2,201 | 6,305 | 0,055620 |
| Состав 4 ПВ + (0,3%Melflux + 0,2%Полидон-А) | 2,324 | 6,402 | 0,058872 |
| Состав 5 ПВ + (0,3%Melflux + 0,2%Полидон-А +15% МК) | 2,432 | 6,502 | 0,061458 |
| Состав 6 ПВ + (0,3%Melflux + 0,2%Полидон-А + 15%МК) + 0,7%БВ | 2,935 | 8,066 | 0,074169 |

Результаты испытаний (таблица 4.8) показали, что максимальное сопротивление воздействию нагрузки при сжатии возросло на 40,91%, условный коэффициент интенсивности напряжений составил 40,92%, а сопротивление нагружающему воздействию при изгибе возросло на 35,1% у образцов бетона, содержащих базальтовое волокно (состав 6) по сравнению с контрольным (состав 1).

При этом необходимо отметить, что во время проведения лабораторных испытаний наблюдался более длительный период увеличения ширины раскрытия магистральной трещины в образце-призме с базальтовым волокном (состав 6) в сравнении с другими (без волокон). Установленный факт ограничения распространения роста магистральной трещины в составе 6 доказывает снижение

концентрации напряжений в зоне макродефектов за счет микроармирования, которое выравнивает напряжение в бетоне. Полученные результаты согласуются с данными авторов [159-161], которые свидетельствуют о повышении сцепления между цементно-песчаной матрицей и базальтовыми волокнами.

4.5 Гидрофизические показатели модифицированного тяжелого бетона

При создании лотков для оросительных каналов в условиях постоянного соприкосновения с водой бетоны должны быть плотными и иметь хорошие гидрофизические свойства: низкие показатели водопоглощения, капиллярного подсоса, водонепроницаемости и высокие показатели морозостойкости и коррозионной стойкости. В работах [101, 125-127, 139, 164, 165] отмечается улучшение гидрофизических свойств бетона с применением модификаторов, особенно, в состав которых включены ингредиенты гидрофобно-пластифицирующего действия на 15–30% и более.

В связи с этим нами были проведены стандартные испытания по методике, описанной во 2 главе пункт 2.1.6 предлагаемых модифицированных составов бетона. Результаты испытаний на водопоглощение и водонепроницаемость представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Результаты испытаний на водопоглощение и водонепроницаемость

| Маркировка образца | Водопоглощение по массе, % | Водонепроницаемость, МПа | Марка бетона по водонепроницаемости |
|--|----------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Состав 1 контрольный заводской ПЦ + 0,3% Melflux | 4,5 | 0,6 | W6 |
| Состав 2 ПВ + 0,3% + Melflux | 2,8 | 0,8 | W8 |
| Состав 3 ПВ + 0,2% Полидон-А | 2,3 | 1,0 | W10 |
| Состав 4 ПВ + (0,3% Melflux + 0,2% Полидон-А) | 2,1 | 1,2 | W12 |

Продолжение таблицы 4.9

| Маркировка образца | Водопоглощение по массе, % | Водонепроницаемость, МПа | Марка бетона по водонепроницаемости |
|---|----------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Состав 5 ПВ + (0,3%Melflux + 0,2% Полидон-А + 15% МК) | 2,0 | 1,4 | W14 |
| Состав 6 ПВ + (0,3% Melflux+ 0,2% Полидон-А + 15%МК) + 0,7% БВ | 1,9 | 1,4 | W14 |

Анализ полученных данных показывает, что введение комплексного модификатора совместно с базальтовым волокном (состав 6, ПВ+(0,3%Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК)+0,7%БВ) снизило показатель водопоглощения на – 57,8%; на 37,8% снизил 2 состав ПВ+0,3% Melflux); на 48,9 % – 3 состав ПВ + 0,2%Полидон-А; на 53,3% – 4 состав ПВ + (0,3%Melflux + 0,2%Полидон-А); на 55,5% – 5 состав ПВ + (0,3%Melflux +0,2%Полидон-А +15% МК) в сравнении с контрольным (состав 1).

Водонепроницаемость модифицированного бетона в 5 составе ПВ+ (0,3%Melflux + 0,2%Полидон-А +15% МК) повысилась на 4 ступени нагружения в сравнении с контрольным составом 1 (ПЦ++ 0,3%Melflux). При этом наличие в составе 6 базальтового волокна ПВ + (0,3%Melflux+ 0,2%Полидон-А + 15%МК) + 0,7%БВ не повлияло на его водонепроницаемость.

На следующем этапе исследований определяли морозостойкость, которая зависит от структуры материала. Известно, что наличие открытых пор доступных для проникновения воды негативно сказывается на морозостойкости и долговечности строительных материалов.

Для проведения испытаний на морозостойкость применялся первый базовый метод по требованиям ГОСТа [124], методика проведения испытания представлена в главе 2 п. 2.1.5.

Результаты испытаний при циклическом попеременном замораживании и оттаивании отображены в таблице 4.10 и рисунке 4.6.

Таблица 4.10 – Результаты испытания бетонов при циклическом попеременном замораживании и оттаивании

| Маркировка образца | Потеря массы образца, %, после циклов | | | | | | K _{мрз} после циклов | | | | | |
|--|---------------------------------------|------|------|------|-----|------|-------------------------------|------|------|------|------|------|
| | 200 | 300 | 350 | 400 | 500 | 600 | 200 | 300 | 350 | 400 | 500 | 600 |
| Состав 1 контрольный заводской ПЦ+0,3% Melflux | 1,18 | 2,18 | 3,15 | 4,32 | - | - | 0,96 | 0,91 | 0,78 | 0,67 | - | - |
| Состав 2 ПВ+0,3%+Melflux | 0,47 | 1,14 | 1,18 | 2,2 | 3,6 | 5,30 | 1,0 | 0,96 | 0,94 | 0,92 | 0,82 | 0,8 |
| Состав 3 ПВ + 0,2% Полидон-А | 0,32 | 1,09 | 1,56 | 2,0 | 3,2 | 4,82 | 1,02 | 0,98 | 0,95 | 0,94 | 0,86 | 0,85 |
| Состав 4 ПВ + 0,3%Melflux + 0,2%Полидон-А | 0,23 | 0,98 | 1,6 | 1,9 | 2,9 | 3,89 | 1,03 | 1,01 | 0,97 | 0,96 | 0,94 | 0,88 |
| Состав 5 ПВ + 0,3%Melflux +0,2%Полидон-А +15% МК | 0,12 | 0,94 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,80 | 1,04 | 1,02 | 0,98 | 0,94 | 0,92 | 0,91 |
| Состав 6 ПВ+0,3%Melflux+ 0,2%Полидон-А + 15%МК + 0,7%БВ | 0,1 | 0,15 | 0,22 | 0,36 | 0,9 | 1,5 | 1,1 | 1,08 | 1,04 | 0,99 | 0,97 | 0,93 |

Примечание. K_{мрз} – отношение показателя прочности образца после испытания его морозостойкости к прочности образца материала в водонасыщенном состоянии до определения морозостойкости.

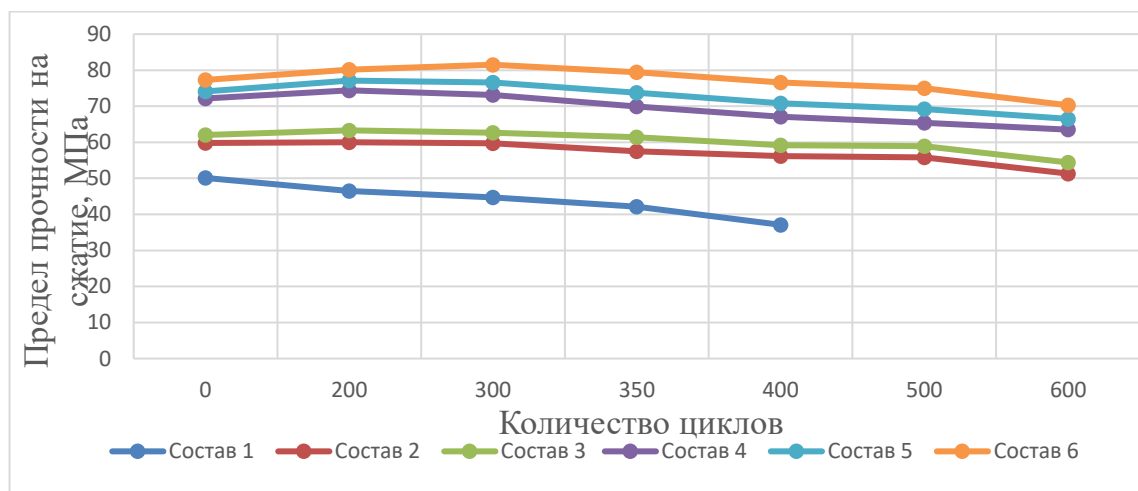


Рисунок 4.6 – Графическая интерпретация результатов испытаний образцов тяжелого бетона при циклическом попеременном замораживании и оттаивании:

- 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

Результаты испытаний при циклическом попеременном замораживании и оттаивании образцов-кубов из бетона различного состава, представленных в таблице 4.10 и рисунке 4.6 показали:

- максимальное снижение массы до 6,32% и кубиковой прочности на 26% в контрольном составе 1 (ПЦ+0,3%Melflux) после 400 циклов испытаний попеременного замораживания и оттаивания, что превышает установленные показатели требования ГОСТ10060-2012 (потеря массы и прочности бетона не более 2% и 15% соответственно).

- высокие характеристики морозостойкости составы, содержащие комплексный модификатор ПВ+(0,3%Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК). 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 предлагаемых составов модифицированного бетона.

Косвенным доказательством, что комплексное модифицирование (состав 6 таблица 4.10) способствует повышению морозостойкости бетона, могут быть результаты испытания бетонов на водопоглощение до и после испытания при циклическом попеременном замораживании и оттаивании (рисунок 4.7).

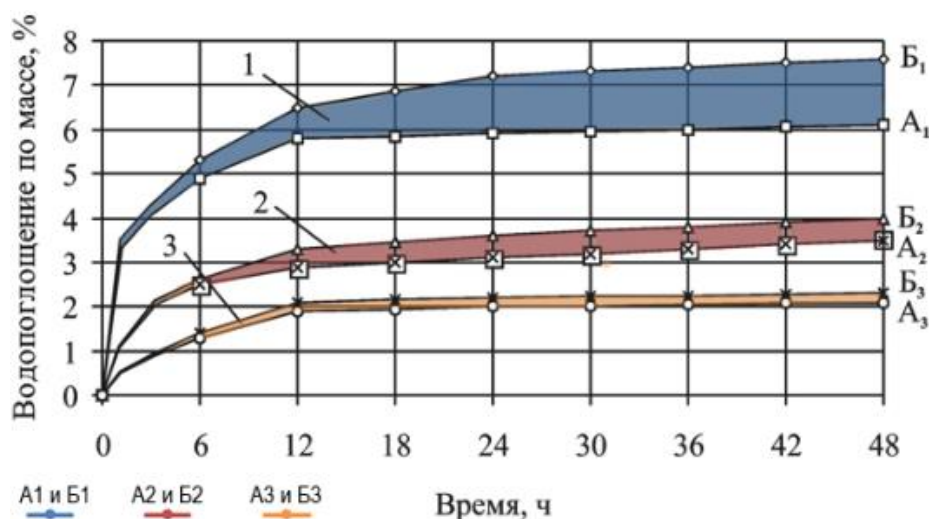


Рисунок 4.7 – Водопоглощение бетонов до и после испытания при циклическом попеременном замораживании и оттаивании:

- 1 – А₁ и Б₁ – контрольный заводской ПЦ + 0,3% Melflux соответственно до и после испытания при циклическом попеременном замораживании и оттаивании;
 2 – А₂ и Б₂ – ПВ + 0,3% Melflux;
 3 – А₃ и Б₃ – ПВ + (0,3% Melflux + 0,2% Полидон-А + 15% МК) + 0,7% БВ

Из рисунка 4.7 видно, что после испытания на морозостойкость (300 циклов попеременного замораживания и оттаивания) исследуемые составы бетонов имеют разное увеличение водопоглощения: прирост водопоглощения контрольного состава составил ПЦ+0,3%Melflux \approx 26%, ПВ + 0,3% Melflux \approx 12%, а с комплексным модификатором ПВ + (0,3% Melflux + 0,2% Полидон-А + 15% МК) + 0,7% БВ \approx 5-7%.

Таким образом, обобщая результаты гидрофизических испытаний, можно прийти к следующему выводу: структура модифицированного цементного камня на основе полидисперсного вяжущего в присутствии комплексного модификатора совместно с базальтовым волокном ПВ+ (0,3%Melflux+ 0,2%Полидон-А + 15%МК) +БВ (состав б) имеет максимально плотную однородную мелкопористую структуру с микропорами 0,1 до 0,6 мкм (см. п. 4.1).

4.6 Коррозионная стойкость

Степень воздействия агрессивной среды в процессе эксплуатации

железобетонных лотков оросительных систем обратно пропорциональна сроку их эксплуатации. Поэтому, бетон для их изготовления должен обладать стойкостью к агрессивному воздействию среды.

Методика определения стойкости разработанного бетона к воздействию агрессивных сред представлено в главе 2, п. 2.1.8. Полученные и обработанные результаты испытаний приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Стойкость к агрессивным средам бетонных образцов по изменению средней массы, предела прочности на растяжение при изгибе и сжатии

| Маркировка | Характеристики | Вид и концентрация агрессивной среды | | | |
|---|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------|---|
| | | NaCl р-р 3% | Дистиллированная вода | HCl 0,01% | Na ₂ SO ₄ р-р 5% |
| Состав 1 контрольный заводской ПЦ+0,3% Melflux | Δm_{cp} , % | 0,132 | 0,066 | 0,232 | -0,081 |
| | ΔR_{cp} , % | 0,243 | 0,120 | 0,540 | -0,132 |
| | ΔR_{tbcp} , % | 0,255 | 0,128 | 0,612 | -0,154 |
| Состав 2 ПВ+0,3%+Melflux | Δm_{cp} , % | 0,112 | 0,056 | 0,186 | -0,094 |
| | ΔR_{cp} , % | 0,184 | 0,102 | 0,392 | -0,146 |
| | ΔR_{tb}^{cp} , % | 0,181 | 0,112 | 0,417 | -0,166 |
| Состав 3 ПВ+ 0,2%Полидон-А | Δm_{cp} , % | 0,102 | 0,057 | 0,185 | -0,096 |
| | ΔR_{cp} , % | 0,174 | 0,096 | 0,374 | -0,142 |
| | ΔR_{tb}^{cp} , % | 0,163 | 0,102 | 0,408 | -0,171 |
| Состав 4 ПВ+(0,3%Melflux+ 0,2%Полидон-А) | Δm_{cp} , % | 0,099 | 0,046 | 0,110 | -0,148 |
| | ΔR_{cp} , % | 0,160 | 0,081 | 0,280 | -0,194 |
| | ΔR_{tbcp} , % | 0,104 | 0,082 | 0,265 | -0,268 |
| Состав 5 ПВ+(0,3%Melflux+ 0,2%Полидон-А +15% МК) | Δm_{cp} , % | 0,096 | 0,048 | 0,121 | -0,136 |
| | ΔR_{cp} , % | 0,158 | 0,072 | 0,240 | -0,222 |
| | ΔR_{tb}^{cp} , % | 0,136 | 0,074 | 0,219 | -0,275 |
| Состав 6 ПВ+(0,3%Melflux +0,2%Полидон-А+ 15%МК)+0,7%БВ | Δm_{cp} , % | 0,090 | 0,052 | 0,126 | -0,135 |
| | ΔR_{cp} , % | 0,146 | 0,063 | 0,236 | -0,212 |
| | ΔR_{tb}^{cp} , % | 0,132 | 0,066 | 0,209 | -0,289 |

Анализ результатов эксперимента, представленных в таблице 4.13 показал, что предлагаемый 6 состав ПВ (+0,3%Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК) + 0,7%БВ имеет высокую стойкость к коррозии. При выдерживании образцов в 3% растворе NaCl потеря массы Δm_{cp} составила -0,090%, прочности на сжатие ΔR_{cp} –

0,146%, при изгибе ΔR_{tb} – 0,132% соответственно.

Исследование кислотной коррозии проводилось в растворе соляной кислоты 0,01% HCl. Наблюдались следующие изменения. Уменьшение снижения: потери средней массы Δm_{cp} – на 45,7%, предела прочности на сжатие ΔR_{cp} – на 56,3%; растяжение при изгибе ΔR_{tb} – на 65,9%, в сравнении с контрольным составом 1 соответственно.

Исследования по коррозии выщелачивания проводились в дистиллированной воде. Получили следующие результаты изменений: уменьшение снижения: потери средней массы Δm_{cp} – на 21,2%, предела прочности на сжатие ΔR_{cp} – на 47,5%; растяжение при изгибе ΔR_{tb} – на 48,4%, в сравнении с контрольным составом 1 соответственно.

На следующем этапе определялось агрессивное воздействие сульфатов. Образцы выдерживались в 5% растворе (Na_2SO_4), по результатам которого повышенные характеристики показали образцы состава 6. Наблюдались: увеличение прироста массы Δm_{cp} – на 66,6%, при этом повысились ΔR_{cp} – на 60,6% и ΔR_{tb} – на 87,6% относительно контрольного (состав 1) соответственно. Полученные результаты испытаний согласуются с результатами работ [166,167].

Полученные положительные результаты подтверждают факт повышения пуццолановой активности (см. п. 4.1) к свободному $Ca(OH)_2$ микрокремнезема, содержащегося в 6 составе ПВ+(0,3%Meiflux+0,2%Полидон-А+15%МК) + 0,7%БВ совместно с базальтовым волокном, обладающим химической стойкостью.

В диссертационной работе проведены исследования кислотной коррозии в соляной кислоте 0,01% HCl, которая значительно сильнее, чем органические кислоты, содержащиеся в кислых почвах, (например, гумусовые, молочные и аминокислоты) и предлагаемый состав 6 показал высокую стойкость к данному виду коррозии. Вероятно, что он также будет показывать высокую стойкость и к воздействию вышеперечисленных органических кислот [168,169].

Выводы по главе 4

1. Анализ данных рентгенофазового анализа показал (таблица 4.1), что в составе 2 (полидисперсное вяжущее ПВ) увеличилось содержание C_3S и C_2S с 24 и 30% до 20 и 22% в сравнении с 1 составом (ЦЕМ I 42,5 Н), а степень гидратации снизилась с 70 до 52% соответственно, за счет наличия в своем составе крупных непрогидратированных до конца частиц вяжущего фракции $150 \text{ м}^2/\text{кг}$, которые образуют запас клинкерного фонда. Введение в полидисперсное вяжущее (состав б) комплексного модификатора ПВ+(0,3% Melflux+0,2% Полидон-А+15% микрокремнезем) дало незначительное снижение содержания основных клинкерных минералов, а степень гидратации увеличилась до 62%. При этом количество портландита $Ca(OH)_2$ уменьшилось более чем на 26% в сравнении с контрольным (состав 2) за счет протекания пуццолановой реакции, сопровождающейся связыванием его микрокремнеземом в менее растворимые и более химически стойкие низкоосновные гидросиликаты кальция.

Доказана положительная роль клинкерного фонда в цементном камне (запас грубодисперсных частиц – фракция $150 \text{ м}^2/\text{кг}$) при испытании цементного камня в возрасте 6 месяцев нормального твердения (состав б*). Установлено снижение содержания C_3S и C_2S на 10 и 11% и $Ca(OH)_2$ до 10,4, соответственно в сравнении с б составом. При этом наблюдалось увеличение степени гидратации с 62 до 82%.

2. Исследования микроструктуры цементного камня с помощью растрового электронного микроскопа (рисунок 4.2) показывают, что наличие в составе комплексного модификатора (0,3% Melflux+0,2% Полидон-А+15% микрокремнезем) позволяет получить плотный цементный камень с равномерно распределенными порами по всему объему при скоплении игольчатых кристаллов этtringита в зоне образования микропор. Размеры кристаллов уменьшаются от 60 до 75 нм. Полученный цементный камень характеризуется мелкопористой структурой с размерами пор в диапазоне от 0,1 до 0,6 мкм.

3. Проведенные исследования модифицированной бетонной смеси (таблица 4.4) показали положительные результаты: предлагаемый состав б на основе

полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором (0,3% Melflux5581F +0,2%Полидон-А+15%МК)+0,7%БВ существенно снизил в 2,1 и 2,2 раза показатели водоотделения и раствооротделения бетонной смеси в сравнении с контрольным (на обычном цементе).

4. Результаты испытаний прочности бетона на сжатие (таблица 4.6) показали повышение в 5 составе ПВ+(0,3% Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК) на 47,9% относительно контрольного состава 1 (ПЦ+0,3% Melflux) и 19,5% относительно состава 2 (ПВ+0,3% Melflux), что составляет в абсолютном выражении на 24 и 12 МПа соответственно. Наличие базальтового микроармирующего волокна (0,7% от массы вяжущего) в составе 6 дает незначительное увеличение прочности на 4,3% по отношению к составу 5 (без фибры). Максимальный прирост прочности на растяжение при изгибе (R_{tb}) имеют образцы состава 6 (таблица 4.6), содержащий комплексный модификатор (0,3% Melflux+0,2%Полидон-А+15%микрокремнезем)+0,7%БВ. Показатель R_{tb} повысился на 49,1% в сравнении с контрольным (состав 1) и на 11,5% в сравнении с 5 составом (без фибры), что в абсолютном выражении составил 2,84 МПа и 0,89 МПа соответственно.

5. Установлен характер разрушения образцов-призм из модифицированного бетона и характеристики трещиностойкости (таблица 4.8), по результатам которых у образцов бетона 6 состава ПВ+(0,3% Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК)+0,7 БВ 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 – без фибры (состав 1).

6. Экспериментально доказано улучшение гидрофизических свойств: 6 состав ПВ+(0,3% Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК)+0,7%БВ снизил показатель водопоглощения на 57,8% в сравнении с контрольным заводским. Водонепроницаемость модифицированного бетона в 5 составе ПВ+(0,3% Melflux +0,2%Полидон-А+15%МК) повысилась на 4 ступени нагружения в сравнении с контрольным составом 1 (ПЦ+0,3% Melflux). При этом наличие в составе 6 базальтового волокна ПВ+(0,3% Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК)+0,7%БВ не

повлияло на его водонепроницаемость. Высокую морозостойкость показали составы 5 и 6, содержащие комплексный модификатор (0,3% Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК). При 600 циклов испытания потеря массы в составе 5 составила 1,8% и 1,5% в 6 составе соответственно. При 600 циклах испытаний снижение прочности в 5 составе на 10,2% и в 6 составе на 9,1% соответственно.

7. Исследования коррозионной стойкости образцов тяжелого модифицированного бетона позволили прийти к следующим выводам: высокой степенью стойкости в агрессивных средах и коррозии выщелачивания обладает 6 состав ПВ+(0,3%Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК)+0,7%БВ. При выдерживании образцов в 3% растворе NaCl потеря массы Δm_{cp} составила -0,090%, прочности на сжатие ΔR_{cp} -0,146%, при изгибе ΔR_{tb} -0,132% соответственно. При выдерживании в растворе соляной кислоты 0,01% HCl наблюдалось уменьшение снижения потери средней массы Δm_{cp} – на 45,7%, предела прочности на сжатие ΔR_{cp} – на 56,3%; растяжение при изгибе ΔR_{tb} – на 65,9%, в сравнении с контрольным составом 1 соответственно. Исследования по коррозии выщелачивания показали следующие результаты изменений – уменьшение снижения: потери средней массы Δm_{cp} – на 21,2%, предела прочности на сжатие ΔR_{cp} – на 47,5%; растяжение при изгибе ΔR_{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 Δm_{cp} – на 66,6%, при этом повысились ΔR_{cp} , – на 60,6% и ΔR_{tb} – на 87,6% относительно контрольного (состав 1) соответственно.

ГЛАВА 5 ОПЫТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ РАБОТЫ ПО ВНЕДРЕНИЮ ТЯЖЕЛОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА В ТЕХНОЛОГИЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЛОТКОВ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

5.1 Техническая эффективность и эксплуатационные свойства тяжелого модифицированного бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором

Эффективность технического решения применения тяжелого модифицированного бетона характеризуется его эксплуатационными характеристиками, которые позволяют ему работать в тяжелых условиях, в частности для железобетонных лотков оросительных систем.

Эксплуатационные свойства модифицированного тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором с расходом Melflux 5581 F 0,3% (заводской состав), Полидона-А 0,2%, базальтового волокна 0,7% и микрокремнезема – 15% от массы вяжущего отображены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Эксплуатационные свойства модифицированного тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором

| Наименование характеристики | Контрольный (заводской) состав ПЦ+0,3%Melflux | ПВ + 0,3%Melflux+ 0,2% Полидон-А +15%МК+0,7%БВ | ГОСТ 24587-81 Лотки-водовыпуски железобетонные оросительных систем. Технические условия |
|---|---|--|---|
| Удобоукладываемость Марка/ОК, см | П2/5 | П2/5 | - |
| Средняя плотность смеси, кг/м ³ | 2400 | 2340 | 2200-2500 |
| Предел прочности на сжатие, МПа/Класс бетона | 50,1/В40 | 77,3/В55 | 22,5/В22,5 |
| Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа | 5,78 | 8,62 | - |
| Условный коэффициент интенсивности напряжений, МПа×м ^{0,5} | 0,052638 | 0,074169 | - |
| Водопоглощение, % масс. | 4,5 | 1,9 | - |
| Модуль упругости, МПа, E _σ | 25587 | 42259 | - |

Продолжение таблицы 5.1

| Наименование характеристики | Контрольный (заводской) состав ПЦ+0,3%Melflux | ПВ + 0,3%Melflux+ 0,2% Полидон-А +15%МК+0,7%БВ | ГОСТ 24587-81 Лотки-водовыпуски железобетонные оросительных систем. Технические условия |
|---|---|--|---|
| Марка бетона по водонепроницаемости | W6 | W14 | - |
| Пористость | 14,52 | 8,6 | - |
| Марка бетона по морозостойкости, F ₁ | 300 | 600 | 200 |

Техническая эффективность модифицированного тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором оценивалась с использованием метода сопоставительного анализа, осуществлявшимся в несколько этапов.

На первом этапе определяли предел прочности на сжатие и на растяжение при изгибе как контрольного, так и разработанных составов. Введение в бетонную смесь разработанного комплексного модификатора, содержащего в своем составе 0,3% суперпластификатора Melflux, 0,2% поливинилпирролидона Полидон-А и 15% микрокремнезема, позволяет повысить предел прочности на сжатие на 54,29 %, (на 27,2 МПа в абсолютных величинах); и предел прочности на растяжение при изгибе на 49,13% (на 2,84 МПа в абсолютных величинах). Результаты сопоставления представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты исследований предела прочности на сжатие и растяжение при изгибе

| Маркировка | Номер образца | Прочность на сжатие, МПа | | Прочность на растяжение при изгибе, МПа | |
|--|---------------|--------------------------|----------------------|---|-----------------------|
| | | R _{сж} | R _{сж} (ср) | R _{тб} | R _{тб} (ср.) |
| Контрольный (заводской) ПЦ+ 0,3% Melflux | 1 | 48,5 | 50,1 | 5,78 | 5,78 |
| | 2 | 51,7 | | 5,76 | |
| | 3 | 50,1 | | 5,79 | |
| ПВ + (0,3% Melflux + 0,2% Полидон-А +15% МК)+0,7% БВ | 4 | 77,9 | 77,3 | 8,62 | 8,62 |
| | 5 | 76,9 | | 8,62 | |
| | 6 | 77,1 | | 8,61 | |

На втором этапе определяли условный коэффициент интенсивности напряжений для контрольного и разработанного состава, включающего в себя

полидисперсное вяжущее, 0,3% суперпластификатора Melflux, 0,2% поливинилпирролидона Полидон-А, 15% микрокремнезема и 0,7% базальтового волокна. Результаты сопоставления представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Характеристики трещиностойкости образцов-призм при неравновесных испытаниях

| Маркировка образца | Наименование показателя | | |
|--|-------------------------|-----------------|--|
| | Нагрузка F_c^* , кН | Напряжение, МПа | Условный коэффициент интенсивности напряжений K_c^* , МПа \times м |
| Контрольный (заводской) ПЦ+0,3%Melflux | 2,083 | 5,971 | 0,052638 |
| ПВ + (0,3%Melflux+ 0,2% Полидон-А +15%МК)+0,7%БВ | 2,935 | 8,066 | 0,074169 |

Анализ таблицы 5.3 показал, что введение разработанного комплексного модификатора совместно с базальтовым волокном, позволило повысить воспринимаемую без разрушения цементного камня максимальную нагрузку на 40,9 % (на 0,852 кН в абсолютных значениях). Напряжение при изгибе образцов также повысилось на 35,1% (2,095 МПа в абсолютных значениях).

На третьем этапе определяли водопоглощение и водонепроницаемость предлагаемого модифицированного бетона полидисперсное вяжущее, 0,3% суперпластификатора Melflux, 0,2% поливинилпирролидона Полидон-А, 15% микрокремнезема и 0,7% базальтового волокна и контрольного состава, содержащего заводской портландцемент и 0,3% суперпластификатора Melflux. Результаты исследования представлены в таблице 5.4.

Таким образом, показано что модифицированный разработанным комплексом добавок бетон имеет водопоглощение на 42% ниже в сравнении с контрольным (на 2,6% содержания влаги по массе в абсолютных числах). Водонепроницаемость разработанного бетона возросла до W14 по сравнению с контрольным составом.

Таблица 5.4 – Результаты испытаний на водопоглощение и водонепроницаемость модифицированного бетона

| Маркировка образца | Наименование показателя | | |
|--|-------------------------|-----------------------------|--|
| | Водопоглощение, % | Водонепроницаемость, МПа | Марка бетона по водонепроницаемости |
| Контрольный (заводской) ПЦ+0,3%Melflux | 4,5 | 0,6 | W6 |
| ПВ+0,3%Melflux+ 0,2% Полидон-А +15%МК+0,7%БВ | 1,9 | 1,4 | W14 |

Возможным объяснением выявленного эффекта повышения характеристик разработанного состава бетонной смеси может являться эффективная совместная работа разработанной комплексной добавки, включающей в себя суперпластификатор Melflux (способствует уплотнению структуры и снижению водоцементного отношения), поливинилпирролидон Полидон-А (оказывает синергетическое воздействие на суперпластификатор), полидисперсное вяжущее, состоящее из трех фракций цемента (создает максимально уплотненную структуру матрицы), микрокремнезема (повышает количество низкоосновных гидросиликатов в новообразованиях) и базальтового волокна (играет роль дисперсного армирования).

На четвертом этапе проводилось определение морозостойкости разработанного бетона. Результаты представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Результаты испытания бетона на морозостойкость

| Маркировка образца | Потеря массы образца, %, после циклов | | | | | | K _{мрз} после циклов | | | | | |
|--|---------------------------------------|------|------|------|-----|-----|-------------------------------|------|------|------|------|------|
| | 200 | 300 | 350 | 400 | 500 | 600 | 200 | 300 | 350 | 400 | 500 | 600 |
| Контрольный заводской ПЦ+0,3% Melflux | 1,18 | 2,18 | 3,15 | 4,32 | - | - | 0,96 | 0,91 | 0,78 | 0,67 | - | - |
| ПВ+0,3%Melflux+ 0,2%Полидон-А + 15%МК + 0,7%БВ | 0,1 | 0,15 | 0,22 | 0,36 | 0,9 | 1,5 | 1,1 | 1,08 | 1,04 | 0,99 | 0,97 | 0,93 |

Проведенные эксперименты показали, что:

- максимальное снижение массы до 6,32% и кубиковой прочности на 26% в

контрольном составе (ПЩ+0,3%Melflux) после 400 циклов испытаний попеременного замораживания и оттаивания, что превышает установленные показатели требования ГОСТ 10060-2012 (потеря массы и прочности бетона не более 2% и 15% соответственно).

- высокие характеристики морозостойкости составы, содержащие комплексный модификатор ПВ+(0,3%Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК). 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 предлагаемых составов модифицированного бетона.

Таким образом, разработанный модифицированный тяжелый бетон на основе полидисперсного вяжущего с комплексной добавкой для железобетонных лотков для оросительных систем, совместно с базальтовым волокном ПВ+(0,3%Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК)+0,7%БВ в сравнении с тяжелым бетоном (контрольным), обладает повышенной технической эффективностью по пределу прочности на сжатие; пределу прочности на растяжение при изгибе; условному коэффициенту интенсивности напряжений; водопоглощению; марке бетона по водонепроницаемости; марке бетона по морозостойкости.

5.2 Экономическая эффективность применения разработанного состава тяжелого бетона, модифицированного комплексной добавкой

По нашим предположениям, применение эффективной разработанной добавки может снизить расходы монодисперсного вяжущего, сохранив при этом требуемые показатели прочности и долговечности лотков оросительных систем, а также снизить себестоимость производства указанных лотков. Для подтверждения указанного предположения была рассчитана экономическая эффективность внедрения разработанного состава модифицированного тяжелого бетона.

Экономическая эффективность оценивалась методом анализа технико-экономических показателей производства лотков по существующей заводской

технологии с известными показателями (вариант № 1), и сравнивалась с разработанной технологией при замене существующего состава на разработанный с комплексной добавкой и сопутствующим незначительным изменением технологической линии (вариант № 2)

Анализ эффективности затрат на материальные ресурсы и производство продукции был выполнен на примере показателей предприятия ООО «Технология-Тула» с мощностью 120 тыс. м³ бетона в год.

Таблица 5.6 – Расчет затрат на материальные ресурсы

| Наименование материала | Ед. изм. | Расход в год | Цена, руб. | Сумма, тыс. руб. |
|--|----------------|--------------|------------|------------------|
| Вариант № 1 – производство по заводской технологии (основной) | | | | |
| Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н | тн | 81100 | 7200 | 583920,0 |
| Природный песок, М _к =2,4 | тн | 157750 | 420 | 66255,0 |
| Гранитный щебень, фр. 5–15 мм | тн | 179550 | 950 | 170572,5 |
| Вода водопроводная холодная | м ³ | 26780 | 42,50 | 1138,15 |
| Суперпластификатор «Melflux 5581 F» | кг | 243,3 | 2000 | 486,6 |
| Итого: | | | | 822 372,25 |
| Вариант № 2 – производство с применением предлагаемого разработанного состава с комплексной добавкой (разработанный) | | | | |
| Полидисперсное вяжущее | тн | 56526,7 | 8000 | 56526,7 |
| Природный песок, М _к =2,4 | тн | 159750 | 420 | 159750,0 |
| Гранитный щебень, фр. 5–15 мм | тн | 182197 | 950 | 182197 |
| Микрокремнезем марки МКУ-95 | т | 9975,3 | 8000 | 9975,3 |
| Вода водопроводная холодная | м ³ | 26780 | 42,50 | 26780 |
| Суперпластификатор «Melflux 5581 F» | кг | 169,58 | 2000 | 169,58 |
| Полидон-А | кг | 113,05 | 345 | 113,05 |
| Базальтовое волокно (БВ) | тн | 395,69 | 150 | 395,69 |
| Итого: | | | | 773773,81 |

Затраты на применение в технологии производства лотков и сопутствующие хозяйственно-бытовые цели в обеих технологиях одинаковы, что показано в таблице 5.7. Отопление помещений и горячая вода требует 68060 Гкал в год. Годовой расход холодной воды был рассчитан с учетом норм расхода

технологической воды и хозяйственно-бытовые нужды согласно СП 30.13330.2020 «СНиП 2.04.01-85* Внутренний водопровод и канализация зданий».

Таблица 5.7 – Расчет стоимости теплоэнергии и воды

| Наименование затрат | Ед. изм. | Кол-во | Цена на ед. изм., руб. | Сумма, тыс. руб. |
|--|----------------|--------|------------------------|------------------|
| Вариант № 1 – производство по заводской технологии (основной) | | | | |
| Горячая вода | Гкал | 68060 | 1970 | 134078,2 |
| Холодная вода | м ³ | 27785 | 42,5 | 1180,86 |
| Итого: | | | | 135259,06 |
| Вариант № 2 – производство с применением предлагаемого разработанного состава с комплексной добавкой | | | | |
| Горячая вода | Гкал | 68060 | 1970 | 134078,2 |
| Холодная вода | м ³ | 27785 | 42,5 | 1180,86 |
| Итого: | | | | 135259,06 |

Расчет стоимости электроэнергии приведен в таблице 5.8

Таблица 5.8 – Расчет стоимости электроэнергии

| Наименование затрат | Ед. изм. | Кол-во | Цена на ед. изм., руб. | Сумма, тыс. руб. |
|--|----------|---------|------------------------|------------------|
| Вариант № 1 – производство по заводской технологии (основной) | | | | |
| Годовой расход электроэнергии, в том числе: | кВт·ч | 5700000 | 5,95 | 33915 |
| на технологические нужды | | 5400000 | 5,95 | 32130,0 |
| на освещение | | 300000 | 5,95 | 1785,0 |
| Вариант № 2 – производство с применением предлагаемого разработанного состава с комплексной добавкой (разработанный) | | | | |
| Годовой расход электроэнергии, в том числе: | кВт·ч | 5800000 | 5,95 | 34986,0 |
| на технологические нужды | | 5560000 | 5,95 | 33082,0 |
| на освещение | | 320000 | 5,95 | 1904,0 |

Себестоимость производства разработанных цементных бетонов складывается из затрат на сырьевые компоненты (наиболее значительная статья

расхода приходится на цемент), электроэнергию, горячую и холодную воду. Дополнительно следует отметить, что производство лотков оросительных систем на основе разработанных составов не требует изменения существующей технологической линии. Затраты на новое оборудование в данном случае отсутствуют. Расчет проведен в соответствии с «Инструкцией по планированию, учету и калькулированию себестоимости продукции на предприятиях по производству железобетонных лотков оросительных систем». Смета затрат на производство товарной продукции представлен в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Смета затрат на производство товарной продукции

| Элементы затрат | Общая сумма, тыс. руб. | |
|---|-------------------------|------------------------------|
| | Вариант 1 (основной) | Вариант 2 (разработанный) |
| 1. Сырьевые материалы для производства бетонной смеси | 822372,25 | 773773,81 |
| 2. Теплоэнергия | 134078,2 | 134078,2 |
| 3. Электроэнергия | 33915,0 | 34986,0 |
| 4. Вода холодная | 1180,86 | 1180,86 |
| 5. Всего полная себестоимость производства | 991546,31 | 944018,87 |
| 6. Всего полная себестоимость производства на 1м ³ модифицированного тяжелого бетона | 8,2629 | 7,8668 |

Годовой экономический эффект составил [121]:

$$\mathcal{E}_r = (Z_1 - Z_2) \cdot A = [(C_1 + E_n \cdot K_1) - (C_2 + E_n \cdot K_2)] \cdot A \quad (5.1)$$

где Z_1 и Z_2 – приведенные затраты на единицу продукции, изготавливаемой соответственно без добавки и с добавкой;

C_1 и C_2 – себестоимость продукции, изготавливаемой соответственно по основному и предлагаемому варианту;

K_1 и K_2 – соответствующие удельные капитальные вложения;

E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

A – годовой объем выпуска продукции, м³.

$$\mathcal{E}_r = [(8272,7 + 0,15 \times 0) - (7623,8 + 0,15 \times 10)] \times 120000 = 77688000 \text{ руб.}$$

$$\mathcal{E}_1 \approx 394 \text{ руб./м}^3$$

Таким образом, экономический эффект от применения предлагаемой комплексной добавки на основе суперпластификатора, полимера и микрокремнезема, составляет ≈ 394 руб. на 1 м^3 модифицированного бетона (по ценам 2023 г.).

5.3 Опытное апробирование эффективного модифицированного тяжелого бетона для производства железобетонных лотков оросительных систем

Для промышленного выпуска бетонных изделий (оросительных лотков) базовым предприятием выбрана организация ООО «Технология-Тула», руководящий состав которой заинтересован в применении прогрессивных целесообразных технических решений. Для проведения опытно-производственных работ были поставлены следующие задачи: поиск и выбор базового предприятия, в условиях которого возможно применение предлагаемого технического решения; разработка технической документации; освоение технологии изготовления изделий (оросительных лотков) на основе предлагаемого модифицированного состава бетона.

На основании разработанного ТУ 236112-016-80769602-2023 «Тяжелый бетон на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором для гидромелиоративного строительства» [Приложение А], утверждённого ООО «ИнжСпецСтрой», и базы данных [Приложение Б] была выполнена промышленная апробация тяжелого бетона для изготовления железобетонных водоотводных лотков серии GRENT MegaT500 в количестве 220 штук и лотков оросительных систем ЛР-6 в количестве 200 штук на заводе «Технология-Тула» [Приложение В].

Изготавливаемые железобетонные лотки оросительных систем должны соответствовать требованиям ГОСТ 24587-81 [127]. Существующие заводские составы бетона и составы были модифицированы и пересчитаны для применения

с предлагаемой комплексной добавкой.

Производство железобетонных лотков оросительных систем осуществлялось на предприятии ООО «Технология-Тула», которое оснащено современными автоматизированными агрегатно-поточными линиями.

Технологическая линия включает в себя операции дозирования сырья, получение бетонной смеси, формования лотков, тепловой обработки и распалубки изделий.

Сырье взвешивается и дозируется отдельно, после чего подается в смеситель. Цемент и заполнители подаются в бетоносмесительный цех (БСЦ) при помощи системы ленточных конвейеров.

Формы для получения лотков оросительных систем подаются на пост подготовки, где проходит операции чистки и смазки. Затем форма собирается и в неё укладываются арматурные каркасы будущих изделий, выравниваясь и укрепляясь при помощи пластмассовых маяков. Одна форма обеспечивает получение нескольких лотков одновременно.

Собранная и подготовленная форма передаётся дальше по технологической линии на пост формования при помощи крана. Форма закрепляется на вибрационном стенде, после чего в неё при помощи бетонопровода подаётся бетонная смесь заданных характеристик. Укладка смеси происходит послойно и равномерно. После формирования массива заполненная форма подвергается вибрационному воздействию в течение двух-трёх минут до максимального уплотнения бетонной смеси. В изделие устанавливаются монтажные петли, дефекты поверхности заглаживаются металлическими шпателями.

После формования формы с изделиями подаются в пропарочную камеру, выдерживают до стабилизации массива бетонной смеси и подвергаются тепловлажностной обработке паром при атмосферном давлении.

После завершения пропаривания формы с готовыми изделиями передаются на пост распалубливания. Изделия извлекают из формы мостовым краном, осматривают качество поверхности и устраняют дефекты (при наличии). После прохождения ОТК лотки штабелируются и направляются на склад готовой

продукции, где происходит окончательное формирование структуры бетона. Со склада изделия отправляются конечному потребителю.

Железобетонные лотки изготавливаются по технологии формования «лицом вниз», вследствие чего гладкая и дающая малую адгезию поверхность внутренней опалубки позволяет сформировать такую же гладкую поверхность бетонного камня с высокой поверхностной плотностью. Вода в таких лотках может течь эффективнее, потери её в толщу бетона снижаются, прилегание лотков друг к другу в местах соединения также улучшается.

На рисунке 5.1. представлен внешний вид готового лотка оросительных систем с опорами. Формирование лотков из разработанных бетонных смесей по указанной технологии позволяет получить качественные изделия, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 24587-81 Лотки-водоотпускники железобетонные оросительных систем. Технические условия.



Рисунок 5.1 Железобетонный лоток оросительных систем типа ЛР-6

Для оценки технической эффективности использовалась стандартная методика сопоставления параметров разработанного бетона с бетоном существующим. Основные показатели прототипа, разработанного бетона и требования норм к соответствующим характеристикам представлены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Эксплуатационные свойства модифицированного тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором

| Наименование характеристики | Контрольный (заводской) ПЦ+0,3% Melflux | ПВ+0,3% Melflux+0,2% Полидон-А + 15%МК + 0,7%БВ | Требования ГОСТ 24587-81 |
|---|---|---|--------------------------|
| Удобоукладываемость Марка/ОК см | П2/5 | П2/5 | - |
| Средняя плотность, кг/м ³ | 2401 | 2417 | 2200-2500 |
| Предел прочности на сжатие, МПа/Класс бетона | 50,1/В40 | 77,3/В55 | 22,5/В22,5 |
| Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа | 5,78 | 8,62 | - |
| Условный коэффициент интенсивности напряжений, МПа×м ^{0,5} | 0,052638 | 0,074169 | - |
| Водопоглощение, % масс. | 4,5 | 1,9 | - |
| Модуль упругости, МПа, E _σ | 25587 | 42259 | - |
| Марка бетона по водонепроницаемости | W6 | W14 | - |
| Пористость, % | 14,52 | 8,6 | - |
| Марка бетона по морозостойкости, F ₁ | 300 | 600 | 200 |

Как видно из таблицы, параметры разработанных бетонных смесей для получения лотков оросительных систем превышают параметры существующих изделий. В частности, предел прочности на сжатие у разработанных составов на 36% выше, чем у прототипа, предел прочности на изгиб выше на 45%, водопоглощение снизилось на 58%, выдерживаемое давление воды выросло на 8 атмосфер, а морозостойкость возросла в 2 раза до 600 выдерживаемых материалом циклов попеременного замораживания и оттаивания.

Таким образом, внедрение предлагаемых технических решений и полученные результаты испытаний показали техническую эффективность и состоятельность предлагаемого эффективного модифицированного тяжелого бетона для производства железобетонных лотков оросительных систем. Результаты исследований были опубликованы в 12 научных статьях [170-181]. Получено свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620513, 01.04.2019 г. [Приложение Б].

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. Полученный модифицированный бетон обладает следующими показателями: 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.

2. С помощью программно-расчетного комплекса, основанного на использовании алгоритма «Drop and Roll», определен оптимальный состав цементного вяжущего различной дисперсности с высокой плотностью упаковки следующего состава: 15% частиц – со средним диаметром $d_{cp} = 12 \text{ мкм}$ и 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% – $d_{cp} = 4,9 \text{ мкм}$, $S_{уд} = 450 \text{ м}^2/\text{кг}$.

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 $R_{сж} = 77,3 \text{ МПа}$, $K_c^* = 0,074 \text{ МПа} \times \text{м}^{0,5}$, $W_m = 1,9\%$.

4. Рентгенофазовый анализ показал, что в составе ПВ+ (0,3% Melflux+0,2% Полидон-А+15% микрокремнезем) снизилось содержание основных клинкерных минералов, количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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, исследован модифицированный цементный камень ПВ+(0,3%Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК). Установлена плотная упорядоченная структура 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 $R_{тб}$ 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: показатель водопоглощения снизился 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 $\Delta m_{ср}$ составила – 0,090%, прочности на сжатие $\Delta R_{ср}$ – 0,146%, при изгибе $\Delta R_{тб}$ – 0,132% соответственно. При выдерживании в растворе соляной кислоты 0,01% HCl наблюдалось уменьшение снижения потери средней массы $\Delta m_{ср}$ – на 45,7%, предела прочности на сжатие $\Delta R_{ср}$ – на 56,3%; растяжение при изгибе $\Delta R_{тб}$ – на 65,9%, в сравнении с контрольным составом. Исследования по коррозии выщелачивания показали следующие результаты изменений – уменьшение снижения: $\Delta m_{ср}$ – на 21,2%, $\Delta R_{ср}$ – на 47,5%; $\Delta R_{тб}$ – на 48,4%, в сравнении с контрольным составом соответственно. При выдерживании в 5% растворе (Na_2SO_4) наблюдалось увеличение прироста массы $\Delta m_{ср}$ – на 66,6%, при

этом повысились $\Delta R_{\text{ср}}$, – на 60,6% и $\Delta R_{\text{тб}}$ – 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 штук и лотков оросительных систем ЛР-6 в количестве 200 штук. Экономический эффект от применения модифицированного бетона на 1 м³ составил ≈ 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 08.09.2022 № 2567-р "Об утверждении Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года" [Электронный ресурс], URL https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_426435.
2. Дронов В.М. Технология и свойства высокоэффективного модифицированного гидротехнического бетона: автореферат... к.т.н., 2005. –24 с.
3. Производство гидротехнических работ. Часть 1. Общие вопросы строительства. Земляные и бетонные работы (В. И. Телешев); АСВ, 2012.
4. Петров М.С. Добавки к бетону для гидромелиоративного строительства //Бетон и железобетон. – 1981. – № 9. – С.12-14.
5. Tkach E.V., Semenov V.S., Tkach S.A., Rozovskaya T.A. Highly effective water-repellent concrete with improved physical and technical properties. Procedia Engineering, vol. 111, 2015. doi:10.1016/j.proeng.2015.07.143
6. Субботин А.С. Основы гидротехники и гидрометрических сооружений: [Учеб. для гидрометеорол. техникумов] / А. С. Субботин. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. - 262 с.
7. Баженов Ю.М., Фомичёв В.Т., Ерофеев В.Т., Федосов С.В., Матвиевский А.А., Осипов А.К., Емельянов. Пути развития строительного материаловедения: новые бетоны. Технологии бетонов. 2012. № 3-4 (68-69). С. 39-42.
8. Перфилов В.А., Ляшенко Д.А., Лукьяница С.В., Лупиногин В.В. Разработка состава наномодифицированного цемента // Инженерный вестник Дона. 2022. № 5 (89). С. 393-402.
9. Баженов Ю.М. Совершенствование технологии и свойства бетона - важнейший резерв экономии ресурсов. Бетон и железобетон. 1983. № 5. С. 7.
10. Калашников В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего // Строительные материалы. 2016. № 1–2. С. 96–103.

11. Айдаров И.П. Оросительные мелиорации / И. П. Айдаров, А. И. Голованов, М. Г. Мамаев. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Колос, 1982. - 176 с.: ил.; 20 см. - (Учеб. пособия для фак. повышения квалификации руководящих кадров колхозов и совхозов и специалистов сел. хоз-ва) (Повышение квалификации).

12. Бандурин М.А., Волосухин В.А. Эксплуатационный мониторинг лотковых каналов оросительных систем. Учебное пособие. — 2-е изд., перераб. и доп. — Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, 2022. — 171 с.

13. Гумбаров А.Д. Оросительные рисовые системы: (Конструкции и автоматизация водораспределения). Учеб. пособие / А. Д. Гумбаров, А. С. Луговой, А. В. Сербинов. - Краснодар: КСХИ, 1982. - 92 с.

14. Свистунов Ю.А. Авторегуляторы для рисовых оросительных систем/ Ю. А. Свистунов; Кубан. гос. аграр. ун-т. - Краснодар: КГАУ, 1996. - 52 с.

15. Багров М.Н. Оросительные системы и их эксплуатация: [Учеб. пособие] / М. Н. Багров, И. П. Кружилин; Пер. Данг Динь Ду. - Москва: Мир; Ханой: Сел. хоз-во, Б. г. (1986). - 214.

16. Ольгаренко Л.Ф. Натурные и лабораторные исследования гидравлических сопротивлений потока в лотковых каналах и метод их расчета [Текст]: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. (05.23.07) / Новочеркас. инж.-мелиор. ин-т. - Новочеркасск: [б. и.], 1974. - 27 с.

17. Бандурин М.А. Оценка и прогнозирование технического состояния лотковых каналов оросительных систем Южного федерального округа: диссертация кандидата технических наук: 06.01.02 / Бандурин Михаил Александрович; [Место защиты: Новочеркас. гос. мелиоратив. акад.] - Новочеркасск, 2007. - 180 с.

18. Патуроев В.В. Физико-химические основы технологии получения полимербетонов и исследование влияния внутренних напряжений на длительную прочность полимербетонных композиций [Текст]: Автореферат дис. на соискание

ученой степени доктора технических наук. (484) / Моск. инж.-строит. ин-т им. В. В. Куйбышева. - Москва: [б. и.], 1972. - 24 с.

19. Соломатов В.И. Технология полимербетонных и армополимербетонных изделий. М.: Стройиздат. 1984. 144 с.

20. Вознесенский В.А., Выровой В.Н., Керш Ф.Я. Современные методы оптимизации композиционных материалов. – Киев: Будівельник. – 1943. – 144 с.

21. Елшин И.М. Полимербетоны в гидротехническом строительстве / И.М. Елшин. - Москва: Стройиздат, 1980. - 191 с.

22. Батраков В.Г. Модификаторы бетона: новые возможности и перспективы // Строительные материалы. 2006. № 10, с. 4.

23. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны / В.Г. Батраков. – Москва: Стройиздат, 1990. с. 394.

24. Пат. 2519313 Российская Федерация. Комплексная добавка / Изотов В.С., Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский государственный архитектурно-строительный университет» - № 2013103948/03, заявл. 29.01.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16 - С.5.

25. Горчаков Г.И., Орентлихер Л.П., Савин В.И. и др. Состав, структура и свойства цементных бетонов. -М.: Стройиздат, 1976, 145с.

26. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В.Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 4–10.

27. Kherraf L., Abdelouhed A., Belachia M., Nebhouh H. Effects of the incorporation of combined additions in cement on the properties of concretes // International review of civil engineering. – 2018. – № 1(9). – P. 31-39.

28. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Некоторые особенности механизма действия органо-минеральных модификаторов на цементные системы // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2017. – № 1. – С. 40-46.

29. Патент №2096389. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Жигулев Н.Ф. Способ приготовления комплексного модификатора бетонной смеси. Оpubл. 20.12.2000.
30. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны // Москва: Парадиз. – 2010. – 258 с.
31. Дворкин Л.И., Гоц В.И., Дворкин О.Л. Испытания бетонов и строительных растворов. Проектирование их составов. – М.: Инфра-Инженерия. – 2016. – 432 с.
32. Патент №2500633 Изотов В.С., Мухаметрахимов Р.Х. Органоминеральный модификатор для фиброцементных композиций. Оpubл.10.12.2013.
33. Лесовик В.С. Классификация активных минеральных добавок для композиционных вяжущих с учетом генезиса / В.С. Лесовик, Л.Д. Шахова, Д.Э. Кучеров, Е.С. Аксютин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2012. №3. - С. 10-14.
34. Хигерович М.И. Улучшение свойств бетона органическими поверхностно-активными добавками [Текст] : Обзор / [Д-р техн. наук М. И. Хигерович, канд. техн. наук В. Е. Байер]. - Москва: ВНИИЭСМ, 1975. - 47 с.
35. Пат. 2288197 Российская Федерация. Комплексный модификатор бетона / Кардумян Г.С., Каприелов С.С., Шейнфельд А.В.; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Предприятие Мастер Бетон» - № 2005111093/03, заявл. 15.04.2005; опубл. 27.11.2006, Бюл. № 33 - С.9.
36. Мухаметрахимов Р.Х. Роль активных минеральных добавок природного происхождения в формировании структуры и свойств гипсоцементно-пуццоланового вяжущего / Р.Х. Мухаметрахимов, А.Р. Галаутдинов // Вестник технологического университета. - 2017. № 6(20). - С. 60-63.
37. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: Издательство АСВ, 2006. 368 с.
38. Довгань И.В. Топологические аспекты структурообразования в дисперсных системах и вяжущих материалах / И.В. Довгань, А.В. Колесников, С.В. Семенова, Г.А. Кириленко // Строительные материалы. 2011. №3. С.100-102.

39. Хархардин А.Н. Структурная топология дисперсных систем / А.Н. Хархардин, В.В. Строкова // Учебное пособие. Белгород: Изд-во БГТУ. 2007. 132 с.
40. Petropavlovskaya V., Novichencova T., Buryanov A.F. and Poleonova Y.Y. Application of Mathematical and Computer Modeling Methods to Manufacture High-Strength Unfired Gypsum Materials. *Procedia Engineering*. (2013), 57. 906-913. DOI 10.1016/j.proeng.2013.04.115.
41. Хархардин А.Н. Уравнения координационного числа в неупорядоченных системах / А.Н. Хархардин, А.И. Топчиев // *Успехи современного естествознания*. 2003. №9. С.47-53.
42. Хархардин А.Н. Структурная топология безлигандных микро- и наночастиц / А.Н. Хархардин // *Известия вузов. Строительство*. 2007. №1. С.130-138.
43. Хархардин, А.Н. Структурная топология дисперсных систем взаимодействующих микро- и наночастиц / А.Н. Хархардин // *Известия вузов. Строительство*. 2011. №5. С.119-125.
44. Королев Е.В. Композиционные материалы как полидисперсные системы. Эффективные модели / Е. В. Королев, А. Н. Гришина, А. М. Айзенштадт // *Региональная архитектура и строительство*. – 2021. – № 3(48). – С. 16-25. – EDN GXUVNA.
45. Королев Л.В. Анализ упаковки полидисперсных частиц в композитных строительных материалах / Л.В. Королев, А.П. Лупанов, Ю.М. Придатко // *Современные проблемы науки и образования*. 2007. №6. Ч.1. С.105-108.
46. Buryanov A., Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K. Simulating the structure of gypsum composites using pulverized basalt waste // *MATEC Web of Conferences*, Warsaw, 2017, Vol. 117. – P. 00026. – DOI 10.1051/matecconf/201711700026.
47. Королев Л.В. Плотная упаковка полидисперсных частиц в композиционных строительных материалах / Л.В. Королев, А.П. Лупанов, Ю.М.

Придатко // Современные проблемы науки и образования. 2007. №6. Ч.1. С.109-114.

48. Белов В.В. Компьютерное моделирование и оптимизирование составов строительных композитов: монография / В.В. Белов, И.В. Образцов. Тверь: ТвГТУ, 2014. 124 с.

49. Сивков С.П. Современные тенденции в производстве цемента в РФ / С.П. Сивков // Российский ежегодник ССС. 2011. С. 77-80.

50. Получение высокопрочных безобжиговых гипсовых материалов на основе техногенных отходов с применением математического и компьютерного моделирования состава сырьевой смеси / В. В. Белов, В. Б. Петропавловская, Ю. Ю. Полеонова, И. В. Образцов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 31-2(50). – С. 563-570. – EDN RBVBDB.

51. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ. – 2010. – 16 с.

52. Королев Е.В., Смирнов В.А., Иноземцев А.С. Динамическое моделирование наноразмерных систем // Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал. М.: ЦНТ «НаноСтроительство». 2012, Том 4, № 3. С. 26–34. URL: http://nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild_3_2012.pdf.

53. Калашников В. И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего. Часть 1. Изменение составов и прочности бетонов / В. И. Калашников // Строительные материалы ежемесячный научно-технический и производственный журнал. М.; Стройматериалы; 1998. 2016. - № 1-2. - С. 96-103.

54. Калашников В.И. Через рациональную реологию в будущее бетонов. Часть 1. Виды реологических матриц в бетонной смеси, стратегия повышения прочности бетона и экономия его в конструкциях; Часть 2. Тонкодисперсные реологические матрицы и порошковые бетоны нового поколения; Часть 3. От высоко прочных и особовысокопрочных бетонов будущего к

суперпластифицированным бетонам общего назначения настоящего // Технология бетонов. 2007. № 5. С. 8–10; 2007. № 6. С. 8–11; 2008. № 1. С. 22–26.

55. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества: Синтез, анализ, свойства, применение: [Учеб. пособие для вузов по спец. "Хим. технология орган. веществ"] / А. А. Абрамзон, Л. П. Зайченко, С. И. Файнгольд; Под ред. А. А. Абрамзона. - Ленинград: Химия: Ленингр. отд-ние, 1988. 199 с.

56. Афанасьев Н. Ф. Добавки в бетоны и растворы / Н. Ф. Афанасьев, М. К. Целуйко. - Киев: Будивэльник, 1989. - 127 с.

57. Кашапов Р.Р., Красиникова Н.М., Морозов Н.М., Хозин В.Г. Влияние комплексной добавки на твердение цементного камня // Строительные материалы. 2015. № 5. С. 27-30. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-725-5-27-30>.

58. Самченко С.В., Егоров Е.С. Влияние ультрадисперсной добавки из предварительно гидратированного цемента на свойства цементной пасты // Техника и технология силикатов. Международный журнал по вяжущим, керамике, стеклу и эмалям. 2019. Т. 26. № 2. С. 52–57.

59. Добшиц Л.М., Кононова О.В., Анисимов С.Н. Кинетика набора прочности цементного камня с модифицирующими добавками // Цемент и его применение. - 2011. № 4.- С. 104-107.

60. Perfilov V.A. Fine-aggregate concrete with polymer and basalt fiber // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety - 2. Building Materials and Products. 2019. С. 022013.

61. Кузнецов Т.В., Энтин З.Б., Альбец Б.С., Гольдштейн Л.Я., Соколава Н.В., Яшина Е.Т. Активные минеральные добавки и их применение // Цемент, 1981, № 10, с. 6-8.

62. Энтин З.Б. Влияние гранулометрического состава тонкомолотых многокомпонентных цементов на их свойства. Научные труды / Энтин З. Б., Степанова И.Б. НИИцемент. М.: - НИИцемент, 1993, вып. 107. - с. 221 – 231.

63. Урьев Н.Б. Физико-химическая динамика дисперсных систем и материалов. Фундаментальные аспекты, технологические приложения: учебное пособие / Н. Б. Урьев - Долгопрудный: Интеллект, 2013. - 232 с.

64. Горшков, Владимир Сергеевич. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ : учебное пособие для химико-технологических специальностей вузов / В. С. Горшков, В. В. Тимашев, В. Г. Савельев. - Москва: Высшая школа, 1981. - 334 с.

65. Житкевич Р.К., Лазопуло Л.Л., Шейнфельд А.В., Ферджулян А.Г., Пригоженко О.В. Опыт применения высокопрочных модифицированных бетонов на объектах ЗАО «Моспромстрой» // Бетон и железобетон. 2005. № 2. С. 2–8.

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

67. Де Шуттер Г. Самоуплотняющийся бетон – путь в будущее // СРІ. Международное бетонное производство. - 2013. - №3. - С. 40-45.

68. Коровкин, М. О. Принципы создания и применения самоуплотняющегося бетона / М. О. Коровкин, М. Н. Замчалин, Н. А. Ерошкина. - Текст: непосредственный // Молодой ученый. - 2015. - № 5 (85). - С. 165-168.

69. Калашников В.И., Калашников В.И., Володин В.М., Ерофеева И.В., Абрамов Д.А. Высокоэффективные самоуплотняющиеся порошково-активированные песчаные бетоны и фибробетоны // Современные проблемы науки и образования. - 2015. - № 1-2.

70. Калашников В.И. Что такое порошково-активированный бетон нового поколения // Строительные материалы. – 2012. - № 10. – С. 70-71.

71. Баженов Ю.М. Высокопрочный бетон для армоцементных конструкций. -М.: Госстройиздат, 1963, 128 с.

72. Сумм Б. Д. Основы коллоидной химии: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Б. Д. Сумм. - 2-е изд., стер. - М.: Издательский центр «Академия», 2007. - 240 с.

73. Рамачандран В.С. Добавки в бетон / В.С. Рамачандран, Р.Ф. Фельдман, М.Коллепарди, П.К. Мехта. - М.: Стройиздат, 1988. – 575.
74. Афанасьев Н.Ф. Добавки в бетоны и растворы / Н.Ф. Афанасьев, М.К. Целуйко. - Киев: Будивэльник, 1989. - 128 с.
75. Товаров В.В. Влияние удельной поверхности компонентов на механическую прочность цементов с микронаполнителями / В.В. Товаров. - М.: Цемент, 1949, № 3. С. 14-17.
76. Энтин З.Б. Многокомпонентные цементы / З.Б. Энтин, Б.Э. Юдович // Научные труды. - М.: НИИЦемент, -1994., вып. 107. - С. 3-76.
77. Величко Е.Г., Лукьянович В.М., Чижмаков Н.Б. Эффективная технология использования минеральных добавок в бетоне. В сб. "Окружающая среда и золошлаковые отходы" / Е.Г. Величко, В.М. Лукьянович, Н.Б. Чижмаков // Тезисы докладов международного симпозиума ЮНЕП/СССР. - М., 1983. - С. 41-42.
78. Кузнецов Т.В., Энтин З.Б., Альбец Б.С., Гольдштейн Л.Я., Соколова Н.В., Яшина Е.Т. Активные минеральные добавки и их применение / Т.В. Кузнецов, З.Б. Энтин, Б.С. Альбец, Л.Я. Гольдштейн, Н.В. Соколова, Е.Т. Яшина. - М.: Цемент, 1981. - № 10 - С. 6-8.
79. Юдович Б.Э. Цементы для бетонов. Основные направления развития / Б.Э. Юдович, З.Б. Энтин, С.А. Зубехин // Тезисы доклада конференции межрегиональной ассоциации "Железобетон" - М., 1995. - С. 7-10.
80. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны важнейшее направление технического прогресса / В.Г. Батраков // Тезисы доклада конференции межрегиональной ассоциации "Железобетон". - М., 1995. - С. 4-6.
81. Рояк С.М. Специальные цементы / С.М. Рояк, Г.С. Рояк. - М.: Стройиздат, 1983. - 279 с.
82. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. - М.: Стройиздат, 1981. - 464 с.

83. Величко, Е.Г. Об оптимальной технологии изготовления вяжущих материалов с минеральными добавками / Е.Г. Величко, В.М. Лукьянович, В. А. Пискарев. // Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева. - 1984. - № 3. - С. 111-113.
84. Тарасов В.Н., Гусев Б.В., Петрунин С.Ю., Короткова Н.П., Гариовесов А.П. Оценка эффективности применения поликарбоксилатных суперпластификаторов для производства бетона // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2018. Т. 4. № 1. С. 29–40.
85. Бабаев Ш.Т. Вяжущее низкой водопотребности - цементы нового поколения и особенности технологии и свойств бетонов на их основе / Ш. Т. Бабаев // Тезисы доклада конференции межрегиональной ассоциации "Железобетон". - М., 1995. - С. 11-15.
86. Степанова В.Ф. Долговечность бетона. – Москва: Ассоциация строительных вузов, 2014. – 126 с.
87. Хаютин Ю.Г. Монолитный бетон: Технология производства работ. – М.: Стройиздат, 1991. – 576 с.
88. Патуроев В.В. Полимербетоны / НИИ бетона и железобетона. – М.: Стройиздат, 1987. – 286 с.
89. Treece R.A.; Jirsa J.O. Bond Strength of Epoxy-Coated Reinforcing Bars // ACI Materials Journal. – 1989. – V. 86. – No. 2. – Mar. – Apr. – P. 167–174.
90. Vipulanandan C. and Dharmarajan N. Analysis of Fracture Parameters of Polymer Concrete // ACI Materials Journal. – 1989. – V. 86. – No. 4. – July-August. – P. 383–393.
91. O'Sell G., Jones J.J. Yield and transient effects during the plastic deformation of solid polymers // Mater.Sci. – 1981. – V.16, № 8. – P. 1956–1974.
92. Дворкин Л.И., Выровой В.Н., Чудновский С.М. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. – Киев: Будівельник. – 1991. – 136 с.
93. Массачца А. Химия пуццолановых добавок и смешанных цементов// 6-й Международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат. – 1976. – Том 3. – С. 209-211.

94. Рамачандран В.С., Фельдман Р.Ф., Коллепарди М. Добавки в бетон. – М.: Стройиздат. – 1988. – 575 с.

95. Соломатов В.И., Дворкин Л.И., Чудновский С.М. Пути активизации наполнителей композиционных строительных материалов// Изв. Вузов: Стр-во и архитектура. – 1987. – №1. – С. 60-63

96. Калашников В.И. Тонкодисперсные реологические матрицы и порошковые бетоны нового поколения. Сборник статей Международной научно-практической конференции «Композиционные строительные материалы. Теория и практика». – Пенза. – 2007. – С. 9-18.

97. Ананьев С.В. Состав, топологическая структура и реологические свойства реологических матриц для производства бетонов нового поколения: диссертация на соискание ученой степени к.т.н. Пенза. – 2011. – 162 с.

98. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. – М.: Технопроект. – 1998. – 768 с.

99. Трофимов Б.Я., Горбунов Л.Я., Крамар Л.Я. Использование отхода производства ферросилиция// Бетон и железобетон. – 1987. – №4. – С. 39-41.

100. Батраков В.Г., Каприелов С.С., Иванов Ф.М., Шейнфельд А.В. Оценка ультрадисперсных отходов металлургических производств как добавок в бетон// Бетон и железобетон. – 1990. – №12. – С. 15-17.

101. Батраков В.Г., Каприелов С.С., Пирожников В.В. Применение отходов ферросплавного производства с пониженным содержанием микрокремнезема // Бетон и железобетон. – 1989. – №3. – С. 22-24.

102. Мчедлов - Петросян О.П., Ушеров - Маршак А.В., Москаленко С.Б. Перспективы использования ПГПФ в технологии сборного железобетона// Бетон и железобетон. – 1986. – №8. – С. 32-33.

103. Ратинов В.Б., Иванов Ф.М. Химия в строительстве. – М.: Стройиздат. – 1971. – 220 с.

104. Калашников В.И. Порошковые высокопрочные бетоны нового поколения // Популярное бетоноведение. – 2007. – №2(16). – С. 44-49.

105. Терехович С.В. О способе определения активности минеральных добавок //Химия и химическая технология. – 1971. – Вып. II. – С. 250-252.
106. Ребиндер П.А. Поверхностно-активные вещества. – М.: Знание. – 1961. – 43 с.
107. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсионных системах. Физико-химическая механика. – М.: Наука. – 1979. – 384 с.
108. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсионных системах. Коллоидная химия. – М.: Наука. – 1978. – 368 с.
109. Kohno Kiyoshi, Amo Kazuo, Horii Katsunori, Takado Akiza Mixture proportions and fundamental properties of stiff consistency concrete containing low quality silica fume // Journal of the Society of Materials Science. – 1987. – Vol. 36. – №406. – P. 710-715.
110. ГОСТ 26633-2015. Межгосударственный стандарт бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. – М.: Стандартинформ. – 2019. – 11 с.
111. Айлер Р. Коллоидная химия кремнезема и силикатов. – М.: Мир. – 1982. – 1128 с.
112. Чукин Г.Д. Химия поверхности и строение дисперсного кремнезема. – М.: Паладин. – 2008. – 172 с.
113. Сафронов В.Н., Щептинов Е.Ю., Петров Г.Г. Влияние активированной цикловой технологии магнитной обработки воды затворения с добавкой жидкого пластификатора на свойства бетонной смеси и мелкозернистого бетона// Актуальные проблемы современного строительства. Международная научно-техническая конференция. – Пенза. – 2011. – С. 56-60.
114. Лайдабон Ч.С. О новом способе поверхностной модификации бетонов // Изв. Вузов. Строительство. – 2004. – №2. – С. 11-14.
115. Козырин Н.А. Об изменении рН рудообразующих растворов // Доклады академии наук СССР. – 1979. – Том 247. – №1. С. 202-205.
116. Козырин Н.А. Об одной из возможных причин изменения рН рудообразующих растворов // Геология рудных месторождений. – 1976. – Том XVIII. – С. 92-96.

117. ГОСТ 30744-2001. Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка. – М.: Стандартиформ. – 2002. – 29 с.

118. Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Корнеев А.И. // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции, Сочи, 01–10 октября 2021 года. – Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2021. – С. 274-277.

119. Ткач С.А. Экологически безопасная технология утилизации техногенных отходов в производстве газобетона: дис.... канд. техн. наук: 05.23.05 / Ткач Семен Андреевич. – М., 2016. – 200 с.

120. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Стандартиформ. – 2018. – 31 с.

121. Темирканов Р.И. Повышение эксплуатационных свойств тяжелого бетона на основе активированного микрокремнезема для шпал высокоскоростных магистралей: диссертация ... кандидата технических наук: 2.1.5 / Темирканов Руслан Ильясович; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»].- Москва, 2022.- 188 с.

122. ГОСТ 29167-21. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 2022. – 13 с.

123. ГОСТ 24452-80 Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. – М.: Стандартиформ. – 2018. – 33с.

124. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. – М.: Стандартиформ. – 2018. – 33 с.

125. ГОСТ 12730.3-2020. Бетоны. Метод определения водопоглощения. – М.: Стандартиформ. – 2021. – 3 с.

126. ГОСТ 12730.5-2018. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости. – М.: Стандартинформ. – 2019. – 19 с.
127. ГОСТ 24587-81. Лотки-водоотпуски железобетонные оросительных систем. Технические условия. – М.: Стандартинформ. – 2015. – 13 с.
128. ГОСТ 27677-88. Защита от коррозии в строительстве. Бетоны. Общие требования к проведению испытаний. – М.: Издательство стандартов. – 1988. – 6 с.
129. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. – М.: Стандартинформ. – 2022. – 14 с.
130. ГОСТ 30515-2013. Цементы. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ. – 2019. – 37 с.
131. ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ. – 2018. – 25 с.
132. ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. – М.: Стандартинформ. – 2007. – 8 с.
133. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. – М.: Стандартинформ. – 2018. – 11 с.
134. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. – М.: Стандартинформ. – 2012. – 11 с.
135. ГОСТ 12.1.007-76. «Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности».
136. ТУ 5952-002-13307094-08. – Рубленое базальтовое волокно. – Московская область, г. Дубна. – ООО "Каменный век. – 2008. – 21 с.
137. Антипов А. А., Аракелян С.М., Кутровская С.В., Кучерик А.О., Ногтев Д.С., Прокошев В.Г. Осаждение металлических наночастиц из коллоидных растворов импульсно-периодическим лазерным излучением // Перспективные материалы. – 2011. – №10. – С. 200-205.

138. Баженов Ю.М., Александрова О.В., Нгуен Д.К., Булгаков Б.И., Ларсен О.А., Гальцева Н.А., Голотенко Д.С. Высокопрочный бетон из материалов Вьетнама // Строительные материалы. – 2020. – №3. – С. 32-38.
139. Zhao Y., Ding P., Ba C., Tang A., Song N., Liu Y., Shi L. Preparation of TiO₂ coated silicate micro-spheres for enhancing the light diffusion property of polycarbonate composites // Displays. – 2014. – Vol. 35. – № 4. – P. 220-226.
140. Соловьев В.И., Ткач Е.В., Серова Р.Ф., Ткач С.А., Тоимбаева Б.М., Сейдинова Г.А. Исследование пористости цементного камня, модифицированного комплексными органоминеральными модификаторами // Фундаментальные исследования. – 2014. – №8-3. – С. 590-595.
141. Анисимов С.Н., Кононова О.В., Лешканов А.Ю., Смирнов А.О. Исследование влияния комплекса модификаторов на кинетику твердения бетонов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. — URL: www.science-education.ru/118-14082 (дата обращения: 19.12.2014).
142. Ткач Е.В. Влияние органоминерального модификатора на физико-механические и деформативные свойства бетона / Е.В. Ткач, М.А. Рахимов, Б.М. Тоимбаева, Г.М. Рахимова // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 3–2. – С. 428–431.
143. Бруссер М. И., Каприелов С. С., Подмазова С. А., Титова Л. А., Шейнфельд А. В., Рекомендации по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов // НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство». Москва, 2016. С.100.
144. Aste, Tomaso. (2006). Volume Fluctuations and Geometrical Constraints in Granular Packs. Physical review letters. 96. 018002. 10.1103/PhysRevLett.96.018002.
145. Riccardo Isola. Packing of granular materials. University of Nottingham, 2008.
146. Bondarev V G, Migal L V and Bondareva T P 2015 Physical and Mathematical Modeling of Systems: Materials XIV of The International Seminar 1 49.
147. Seckendorff, Jennie; Hinrichsen, Olaf (2021): Review on the structure of random packed-beds. In Can J Chem Eng 99 (S1), p. 385.

148. Von Seckendorff, J, Hinrichsen, O. Review on the structure of random packed-beds. *Can J Chem Eng.* 2021; 99: S703– S733. <https://doi.org/10.1002/cjce.23959>.

149. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Коновалова В.С., Караваев И.В. Определение ресурса безопасной эксплуатации конструкций из бетона, содержащего гидрофобизирующие добавки // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности.* 2017. № 6 (372). С. 268-276.

150. Гришина А.Н., Королев Е.В., Михеев А.В., Гладких В.А. Влажностные деформации бетона, подверженного щелочной коррозии. Экспериментальные результаты // *Вестник гражданских инженеров.* 2020. № 6 (83). С. 140-148.

151. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Микрокремнезём в бетоне // *Обзорная информация.* -М.: ВНИИНТПИ, 1993, 38с.

151. Минеральные вяжущие вещества: [Учеб. для вузов по спец. "Пр-во строит. изделий и конструкций"] / А. В. Волженский. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва: Стройиздат, 1986. С. 463.

152. Хигерович М.И. Гидрофобный цемент. – М., 1957. – С.124-141.

153. Хигерович М.И., Байер В.Е. Гидрофобно-пластифицирующие добавки для цемента, растворов и бетонов. – М., 1979. – С. 124-141.

154. Ратинов В.Б., Классификация добавок по механизму их действия на цемент // Шестой междунар. конгресс по химии цемента в Москве. 1974. – М.: Стройиздат, 1976. – Т.2. – С.18-21.

155. ГОСТ 10181-2014. Смеси бетонные. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ. – 2019. – 23 с.

156. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия. – М.: Стандартинформ. – 2018. – 18 с.

157. Afroz M., Patnaikuni I., Venkatesan S. Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium // *Construction and building materials.* – 2017. – Vol. 154. – P. 191-203.

158. Attia K., Elrefai A., Alnahhal W., Rihan Y. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with bfrp and gfrp bars // Composite structures. – 2019. – №. 211. – P. 1-12.

159. Хозин В.Г., Красиникова Н.М., Морозов И.М., Хохряков О.В. Оптимизация состава цементного бетона для аэродромных покрытий // Известия казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – №2(28). – С. 166-172.

160. Ключев А.В., Ключев С.В., Нетребенко А.В., Дураченко А.В. Мелкозернистый фибробетон, армированный полипропиленовым волокном // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2014. – №4. – С. 67-72.

161. Sun X., Gao Z., Cao P., Zhou C. Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete // Construction and building materials. – 2019. – № 202. – P. 58-72.

162. Боровских И.В., Хозин В.Г. Изменение длины базальтовых волокон при Получении композиционного вяжущего для высокопрочных базальтофибробетонов // Известия КазГ АСУ. – 2009. – №2. – С. 234-238.

163. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Т.К. Реологические особенности цементно-минеральных систем, пластифицированных поликарбоксилатным пластификатором // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №3(40). – С. 24-34.

164. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Корженко А., Бурьянов А.Ф., Пудов И.А., Лушникова А.А. Модификация цементных бетонов многослойными углеродными нанотрубками // Строительные материалы. – 2011. – №2. – С. 47-51.

165. Коррозия бетона и железобетона, Методы их защиты / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гузеев; под ред. В. М. Москвина. - Москва: Стройиздат, 1980. - 536 с.

166. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Устинов А.Г., Кондрик А.С. Коррозионная стойкость бетона с добавкой углерод-кремнеземистого

наномодификатора // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 5 (43). – С. 62-67.

167. Розенталь Н.К., Степанова В.Ф., Чехний Г.В. Бетоны высокой коррозионной стойкости и нормирование их характеристик // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2017. – № 3-4 (218-219). – С. 14-19.

168. Курочка П.Н. Стойкость бетона в органических агрессивных средах: дисс. докт. техн. наук. Ростов-на-Дону. 2000. 288 с.

169. Волженский А.В. и др. Минеральные вяжущие вещества. М.: Стройиздат, 1979.

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

171. Величко Е.Г., Шуმიлина 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.

172. Величко Е.Г., Шуმიлина 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.

173. 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.

174. 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):112-119. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-112-119.

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

176. Tkach E.V., Filimonova YU.S. Modified heavy concrete based on polydisperse binder for hydromeliorative construction // Technique and technology of silicates. 2022.Vol. 29. № 4. P. 326 – 334.

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

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

179. Tkach E. V., Semenov V. S. and Shumilina Y. S. Optimization of the composition and technological processes of dispersed cement systems with high performance properties // VII International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education" (IPICSE 2020). Vol. 1030 (2021), 012024. DOI:10.1088/1757-899X/1030/1/012024.

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

181. Ткач Е.В., Шумилина Ю.С. Оптимизация параметров получения дисперсных цементных систем // В сб.: Актуальные проблемы строительной отрасли и образования: 2020. С. 269-276.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. ТУ 236112-016-80769602-2023 «Тяжелый бетон на основе
полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором для
производства железобетонных лотков оросительных систем»**

ООО «ИнжСпецСтрой»

ОКП 58 5900

Группа Ж71

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор
ООО «ИнжСпецСтрой»



А.В. Безруков

«25» января 2023 г.

**Тяжелый бетон на основе полидисперсного вяжущего
с комплексным модификатором для производства
железобетонных лотков оросительных систем**

ТУ 236112-016-80769602-2023

Технические условия

Дата введения: «25» января 2023 г.

Без ограничения срока действия

Разработано:

Аспирант НИУ МГСУ
_____/ Ю.С. Филимонова /
Профессор, д.т.н., НИУ МГСУ
_____/ Е.В. Ткач

г. Москва 2023 г

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

СОДЕРЖАНИЕ

| № раздела | Наименование раздела | № стр. |
|--------------|--|--------|
| Раздел 1 | Общая часть | 4 |
| Раздел 2 | Технические требования | 4 |
| Раздел 3 | Правила приемки и методы испытаний | 5 |
| Раздел 4 | Маркировка, хранение и транспортирование | 8 |
| Раздел 5 | Указания по эксплуатации | 8 |
| Раздел 6 | Гарантии изготовителя | 8 |
| Приложение А | Перечень нормативно-технической документации | 9 |
| Приложение Б | Лист регистрации изменений | 10 |

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

Настоящие технические условия (ТУ) разработаны на основе ГОСТ 24587-81 и ГОСТ 4795-53 в соответствии с ГОСТ 2.114-2016 и распространяются на модифицированную тяжелую бетонную смесь и бетон на ее основе, полученный путем введения модификатора, микрокремнезема, базальтового волокна (далее по тексту комплексной добавки), предназначенный для производства железобетонных лотков оросительных систем в сложных условиях эксплуатации, в том числе в специфичных природных условиях.

| | | | | | | | | | | | |
|------|------|----------|-------|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | Име. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Име. № дубл. | Подп. и дата | ТУ 236112-016-80769602-2023 | Лист |
| | | | | | | | | | | | 3 |

1. Общая часть

Настоящие технические условия распространяются на модифицированную тяжелую бетонную смесь и бетон на её основе, с применением цементных вяжущих и плотных заполнителей, применяемые для изготовления железобетонных лотков оросительных систем.

2. Технические требования

2.1 Требования настоящего стандарта следует соблюдать при разработке проектной и технологической документации на тяжелую бетонную смесь и бетон на её основе.

2.2 Бетоны следует изготавливать в соответствии с требованиями настоящего стандарта, а также установленным обязательным требованиям ГОСТ 24587-81, ГОСТ 26633-2015 и техническим условиям на изделия и конструкции конкретных видов, утвержденных в установленном порядке.

2.3 Характеристики

2.3.1 По показателям качества бетоны подразделяют:

- по прочности:

на классы прочности на сжатие (В);

на классы прочности на осевое растяжение (В_т);

на классы прочности на растяжение при изгибе (В_{из});

- по морозостойкости:

на марки по первому базовому методу: (F₁);

на марки по второму базовому методу: (F₂);

- по водонепроницаемости на марки: (W);

- по истираемости при испытании на круге истирания на марки: (G).

2.3.2 Лотки следует изготавливать из тяжелого бетона марки по прочности на сжатие М300.

Лотки должны удовлетворять требованиям ГОСТ 13015.0—83:

по показателям фактической прочности бетона (в проектном возрасте и отпускной);

по морозостойкости и водонепроницаемости бетона;

к качеству материалов, применяемых для приготовления бетона;

к бетону, а также к материалам для приготовления бетона лотков, применяемых в условиях воздействия агрессивных грунтов и грунтовых вод;

к форме и размерам арматурных и закладных изделий и их положению в лотке;

к маркам сталей для арматурных и закладных изделий, в том числе для монтажных петель;

от отклонения толщины защитного слоя бетона;

по защите от коррозии;

по применению форм для изготовления лотков.

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

| | | | | |
|------|------|----------|-------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
| | | | | |

ТУ 236112-016-80769602-2023

Лист

4

2.3.3 Нормируемая отпускная прочность бетона должна составлять 70% марки бетона по прочности на сжатие.

2.3.4 Заполнители, применяемые для приготовления бетона лотков, должны удовлетворять требованиям ГОСТ 10268—80. Наибольшая крупность заполнителя должна быть не более 15 мм.

2.3.5. Бетон, применяемый для изготовления лотков, должен приготовляться на портландцементе марки не ниже 400 по ГОСТ 10178—76, а для изготовления лотков, предназначенных для эксплуатации в грунтах с агрессивными водами, — на сульфатостойком портландцементе по ГОСТ 22266—76. Применение шлакопортландцемента, пуццоланового портландцемента, а также портландцемента с активными добавками не допускается.

2.3.6. Толщина защитного слоя бетона до рабочей арматуры должна быть не менее 15 мм. Для лотков, эксплуатируемых в условиях агрессивной среды, отклонения толщины защитного слоя бетона до арматуры не должны быть более плюс 3 мм.

2.3.7. Сварные арматурные и закладные изделия должны удовлетворять требованиям ГОСТ 10922—75. Продольные стержни сеток ненапряженных лотков должны выполняться из горячекатаной стали периодического профиля диаметром 6 мм класса А-Ш по ГОСТ 5781—82. Поперечное армирование лотков должно выполняться из арматурной проволоки периодического профиля класса Вр-1 диаметром 5 мм по ГОСТ 6727—80.

2.3.8. На внутренней поверхности раструба и на наружной поверхности конца лотка в зоне расположения уплотняющих материалов не допускаются наплывы и околы бетона, а также раковины диаметром более 3 мм и глубиной более 2 мм. Число раковин на площади 0,01 м² (100X100 мм) на любом участке указанной зоны поверхности должно быть не более трех. Остальная бетонная поверхность лотка должна быть категории АС по ГОСТ 3015.0—83.

На поверхности лотков не допускаются трещины, за исключением местных усадочных трещин шириной не более 0,1 мм на наружной поверхности раструба и технологического прилива в шельге лотка.

2.3.9. Закладные изделия фиксаторов в лотках типа ЛРГ следует изготавливать из стальной полосы марки ВСт.Зсп2 по ГОСТ 103—76, арматуры класса А—1 по ГОСТ 5781—82 и приваривать к арматурной сетке раструба.

2.3.10. Предприятия-изготовители лотков должны поставлять потребителям лотки в комплекте с уплотняющими материалами для герметизации стыковых соединений: жгуты из резины круглого сечения по ГОСТ 6467—79 или резиновые пористые прокладки по ГОСТ 19177-81.

3. Правила приемки и методы испытаний

3.1 Приемку лотков следует производить партиями в соответствии с требованиями ГОСТ 13015.1—81 и настоящего стандарта. Число лотков в партии должно быть не более: 200 - для лотков высотой 400—800 мм;

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

| | | | | |
|------|------|----------|-------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
|------|------|----------|-------|------|

ТУ 236112-016-80769602-2023

Лист
5

100 — для лотков высотой 1000 мм.

3.2. Приемку лотков по показателям морозостойкости и водонепроницаемости бетона следует проводить по результатам периодических испытаний.

3.3. Приемку лотков по показателям их водонепроницаемости, прочности бетона (марке по прочности на сжатие и отпускной прочности), соответствия арматурных и закладных изделий проектной документации, прочности сварных соединений, точности геометрических параметров, толщины защитного слоя бетона до арматуры, ширины раскрытия усадочных трещин, категории бетонной поверхности следует проводить по результатам приемо-сдаточных испытаний и контроля. Испытанию на водонепроницаемость следует подвергать 1% лотков от партии, но не менее двух лотков.

3.4. Приемку лотков по показателям точности геометрических параметров, толщины защитного слоя бетона до арматуры, качества бетонных поверхностей, контролируемым путем измерений, следует осуществлять по результатам одноступенчатого выборочного контроля.

3.5. Размеры лотков, положение монтажных нетель, толщину защитного слоя бетона до арматуры, а также качество поверхностей и внешний вид лотков проверяют по ГОСТ 13015—75. Измерение толщины стенки производят в торцах лотков равномерно по периметру сечения лотка не менее чем в пяти точках. Неперпендикулярность торцевых плоскостей лотка к его продольной оси определяют измерением наибольшего зазора между торцевой плоскостью лотка и металлическим поверочным угольником, установленным под прямым углом к борту лотка.

Определение толщины защитного слоя бетона, размеров и расположения арматуры может производиться также просвечиванием ионизирующими излучениями по ГОСТ 17625—83.

3.6. Прочность бетона на сжатие следует определять по ГОСТ 10180-78. Контроль и оценку однородности и прочности бетона лотков следует производить по ГОСТ 18105.1—80.

В случае, если при проверке будет установлено, что фактическая отпускная прочность бетона лотков ниже требуемой отпускной прочности, то поставку лотков потребителю следует производить после достижения бетоном прочности, соответствующей марке бетона по прочности на сжатие.

3.7. Морозостойкость бетона следует определять по ГОСТ 10060—76, водонепроницаемость бетона — по ГОСТ 12730.5—78.

3.8. Испытание лотков на водонепроницаемость проводят на специальном стенде в порядке, указанном в ГОСТ 24587-81.

При перевозке лотков железнодорожным транспортом их погрузка, крепление должны производиться в соответствии с действующими инструкциями по перевозке грузов, утвержденными Министерством путей сообщения.

После приложения каждой ступени нагрузки лоток выдерживают под этой нагрузкой в течение 15 мин и производят осмотр лотка с целью обнаружения трещин, течи или влажных пятен.

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

Лоток, полностью заполненный водой, выдерживают в течение суток.

3.9. Партию лотков считают выдержавшей испытание на водонепроницаемость, если во всех лотках, отобранных из этой партии в количестве, установленном в п. 3.3, через сутки после их наполнения не будет обнаружено фильтрации воды в виде влажных пятен или течи.

При получении неудовлетворительных результатов испытаний хотя бы на одном лотке, проводят повторное испытание удвоенного количества образцов, взятых из той же партии. При неудовлетворительном результате повторных испытаний партию считают не выдержавшей испытания.

| | | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | ТУ 236112-016-80769602-2023 | Лист |
| | | | | | | 7 |
| Име. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Име. № дубл. | Подп. и дата | | |
| | | | | | | |

4. Маркировка, хранение и транспортирование

4.1. Маркировка лотков — по ГОСТ 13015.2—81. Маркировочные надписи и знаки следует наносить на наружной поверхности раструба лотка.

4.2. Транспортирование и хранение лотков — по ГОСТ 13015.4—84 и настоящему стандарту.

Лотки укладывают в штабели на специальных прокладках, исключающих возникновение распорных усилий, раструбами и разные стороны. Под нижний лоток устанавливают подкладки. Высота штабеля не должна превышать 2 м.

4.3. Проходы между штабелями следует устраивать в продольном направлении через каждые два смежных штабеля, а и поперечном — не реже чем через 25 м. Ширина проходов должна быть не менее 0,7 м, а величина зазоров между смежными штабелями — не менее 0,2 м.

4.4. Перевозка лотков автотранспортом должна производиться на автомашинах, оборудованных специальными контейнерами.

4.5. Лотки транспортируют как в рабочем, так и в нерабочем положении (дном вверх).

4.6. Требования к документу о качестве лотков, поставляемых потребителю — по ГОСТ 13015.3—81.

5. Указания по эксплуатации

5.1. Укладка лотка на стоечные опоры разрешается при достижении бетоном омоноличивания стойки прочности не ниже 50% от проектной, пуск воды по лоткам — при 100% прочности бетона.

5.2. Для обеспечения водонепроницаемости рекомендуются применять жгуты круглого сечения из резины или паронизола. Для обеспечения герметичности стыков жгуты из резины или паронизола должны быть обжаты соответственно на 30 и 50%.

6. Гарантии изготовителя

6.1. Завод-изготовитель гарантирует соответствие поставляемых им изделий требованиям настоящего стандарта при соблюдении потребителем правил транспортирования и хранения, установленных настоящим стандартом.

6.2. Некачественные лотки завод-изготовитель обязан заменить в сроки, согласованные с потребителем.

| | |
|--------------|--------------|
| Име. №лодл. | Подп. и дата |
| Взам. инв. № | Име. №доубл. |
| Подп. и дата | Подп. и дата |

| | | | | | | |
|------|------|----------|-------|------|------------------------------------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | ТУ 236112-016-80769602-2023 | Лист |
| | | | | | | 8 |

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

| | |
|-------------------------|--|
| ГОСТ 2.114-2016 | ЕСКД. Технические условия. |
| ГОСТ 24211-2008 | Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. |
| ГОСТ 26633-2015 | Межгосударственный стандарт бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия |
| ГОСТ 10180-2012 | Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам |
| ГОСТ 29167-21 | Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении |
| ГОСТ 10060-2012. | Бетоны. Методы определения морозостойкости |
| ГОСТ 12730.5-2018 | Бетоны. Методы определения водонепроницаемости |
| ГОСТ 12730.3-2020 | Бетоны. Метод определения водопоглощения |
| ГОСТ 27677-88 | Защита от коррозии в строительстве. Бетоны. Общие требования к проведению испытаний |
| ГОСТ 31108-2020 | Цементы общестроительные. Технические условия |
| ГОСТ 30515-2013 | Цементы. Общие технические условия |
| ГОСТ 8735-88 | Песок для строительных работ. Методы испытаний |
| ГОСТ 30108-94 | Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов |
| ГОСТ 24587-81 | Лотки-водоотпускники железобетонные оросительных систем. Технические условия |
| ГОСТ 8267-93 | Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия |
| ГОСТ 23732-2011 | Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. |
| ГОСТ 12.1.007-76 | «Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности» |
| ТУ 5952-002-13307094-08 | Рубленое базальтовое волокно |
| ГОСТ 10181-2014 | Смеси бетонные. Методы испытаний |
| ГОСТ 7473-2010 | Смеси бетонные. Технические условия |
| ГОСТ 12.3.009-76 | Система стандартов безопасности труда. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования безопасности |
| ГОСТ 12.1.007-76 | ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. |
| ГОСТ 14192-96 | Маркировка грузов |

Подп. и дата

Име. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Име. № подл.

| | | | | |
|------|------|----------|-------|------|
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

ТУ 236112-016-80769602-2023

Лист

9

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Свидетельство о государственной регистрации базы
данных**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2019620513

«База данных способов приготовления органоминеральных комплексных модификаторов гидрофобизирующего действия для повышения эксплуатационной надежности железобетонных изделий в условиях воздействия агрессивных сред»

Правообладатель: *Садчикова Юлия Сергеевна (RU)*

Автор: *Садчикова Юлия Сергеевна (RU)*

Заявка № **2019620389**

Дата поступления **22 марта 2019 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре баз данных **01 апреля 2019 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

 *Г.П. Излиев*



ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акт о внедрении результатов исследований

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ООО «ЗЖБИ Технологии Тула»
ИНН 7103043263



Филин В.В.

АКТ

о внедрении тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором для производства железобетонных лотков оросительных систем

Мы, нижеподписавшиеся, Трифонов И.Н., Ткач Е.В., Филимонова Ю.С. составили настоящий акт об опытном внедрении тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором для гидромелиоративного строительства, разработанного аспирантом кафедры «Строительное материаловедение» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» Филимоновой Юлией Сергеевной в период 06-09 февраля 2023 г.

Для изготовления модифицированного тяжелого бетона использовались следующие компоненты:

- Портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н, выпускаемый ООО «Холсим (Рус) СМ» по ГОСТ 31108-2020; с пределом прочности при сжатии в возрасте: 2 суток – 26,5 МПа, 28 суток – 45,5 МПа; сроки схватывания: начало - 175 мин.; удельная поверхность – 350 м²/кг; нормальная густота цементного теста – 26,0%; ложное схватывание – отсутствует; истинная плотность – 3150 кг/м³; насыпная плотность – 1250 кг/м³; содержание минералов, % : С3S – 60,92; С4АF – 10,74, С3А – 6,97, С2S – 11,5.
- Природный песок Хромцовского карьера истинной плотностью – 2625 кг/м³; модуль крупности – 2,5; насыпная плотность – 1620 кг/м³; удельная эффективная активность естественных радионуклидов – 75,1 Бк/кг; содержание глинистых и пылевидных частиц – 1,3 %.
- Гранитный щебень фракции от 5 до 15 мм производства ООО «Богаевский карьер» маркой по: дробимости – 1400, морозостойкости – 300, истираемости – И-1; содержанием зерен пластинчатой и игловатой формы – 12,0 %; пылевидных, илстых и глинистых частиц – 0,93%; насыпной плотностью – 1385 кг/м³; удельной эффективностью активности радионуклидов – 90 Бк/кг.

- Гиперпластифицирующая добавка – «Melflux 5581 F» ((BASF Construction Additives (Германия) является самым эффективным и наиболее универсальным гиперпластификатором последнего поколения на основе эфиров поликарбоната, разжижителем и противоусадочным компонентом для сухих строительных смесей (ССС) и других строительных материалов на основе портландцемента, гипса и их смесей. Обеспечивает высокую раннюю прочность, оптимальную когезию и максимальное самоуплотнение при низком расходе. Для многих систем на основе портландцемента различных российских производителей наиболее эффективным является именно Melflux 5581 F. Рекомендуемая дозировка сухого поликарбонатного гиперпластификатора Melflux 5581 F составляет 0,03–0,5 % от массы вяжущего. Точное значение определяется по результатам лабораторных испытаний.

- Полимерная добавка «ПОЛИДОН-А», продукция ООО «Оргполимерсинтез» представляет собой водный раствор поливинилпирролидона, применяющийся в пищевой промышленности как загуститель, осветлитель, стабилизатор, а также диспергирующий агент. Молекулярная формула: C_6H_9NO ; Масса молярная: 2.500 - 2.500.000 г/моль; Плотность: 1200 кг/м³, Температура плавления: 150-180 °С.

- Микрокремнезем марки МКУ-95 производства ООО НТЦ "ЭВЕРЕСТ" с размером частиц 5-50 мкм и содержанием массовой доли диоксида кремния (SiO_2) – 96,66 %.

Качество применяемых сырьевых материалов соответствовало требованиям действующих технических документов. Рабочий состав формуемой смеси эффективного модифицированного тяжелого бетона для железобетонных лотков оросительных систем представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Рабочий состав модифицированной тяжелой смеси

| Материал | Расход материалов на 1 м ³ бетонной смеси, кг/м ³ |
|-----------------------------------|--|
| | ПВ + (0,3% Melflux + 0,2% Полидон-А +15% МК) + 0,7% БВ |
| Полидисперсное вяжущее | 308 |
| Вода | 180 |
| Гранитный щебень | 950 |
| Песок | 895 |
| Гиперпластификатор Melflux 5581 F | 1,09 |
| Микрокремнезем МКУ-95 | 54 |
| «ПОЛИДОН-А» | 0,72 |
| Базальтовое волокно (БВ) | 2,16 |




В лабораторных условиях были получены следующие результаты испытаний модифицированного тяжелого бетона, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Эксплуатационные характеристики модифицированного тяжелого бетона

| Показатели смеси и бетона | Контрольный (без модиф.) | ПВ+0,3% Melflux+0,2% Полидон-А + 15%МК + 0,7%БВ |
|---|--------------------------|---|
| Удобоукладываемость Марка/ОК см | П2/5 | П2/5 |
| Средняя плотность, кг/м ³ | 2401 | 2417 |
| Предел прочности на сжатие, МПа/Класс бетона | 50,1/В40 | 77,3/В55 |
| Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа | 5,78 | 8,62 |
| Условный коэффициент интенсивности напряжений, МПа×м ^{0,5} | 0,052638 | 0,074169 |
| Водопоглощение, % масс. | 4,5 | 1,9 |
| Модуль упругости, МПа, E _с | 25587 | 42259 |
| Марка бетона по водонепроницаемости | W6 | W14 |
| Пористость | 14,52 | 8,6 |
| Марка бетона по морозостойкости, F ₁ | 300 | 600 |

В качестве опытной партии на заводе «Технология-Тула» были изготовлены железобетонные водоотводные лотки Лоток GRENT MegaT 500 в количестве 220 штук и лотки оросительных систем ЛР-6 в количестве 200 штук, с применением разработанного состава модифицированного тяжелого бетона, соответствующего установленным требованиям ГОСТ 24587-81.

СОГЛАСОВАНО:

| Должность | Подпись | Расшифровка | Дата |
|---|--|-----------------|---------------|
| Профессор, д.т.н., кафедры «Строительное материаловедение» ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ) |  | Ткач Е.В. | 06.02.2023. |
| Аспирант кафедры «Строительное материаловедение» "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ) |  | Филимонова Ю.С. | 06.02.2023 г. |
| Инженер ОТК |  | Трифонов И.Н. | 06.02.2023 |