МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСЩЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Южно-казахстанский университет им.М.Ауэзова

УДК 666.972.4

На правах рукописи

ҚҰТТЫБАЙ МҰСА ТАЛҒАТҰЛЫ

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛИТОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

8D07340 – «Производство строительных материалов, изделий и конструкций»

Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии (PhD)

Научные консультанты:
Кандидат технических наук, профессор
Копжасаров Б.Т.

Доктор технических наук, профессор
Пухаренко Ю.В.

Шымкент, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

	НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	5
	ОПРЕДЕЛЕНИЯ	6
	ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	8
	ВВЕДЕНИЕ	9
1	**СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**	15
1.1	Анализ применения литых модифицированных бетонов для строительства	15
1.2	Регулирование внутренней структуры вяжущих материалов с учетом топологической неопределенности	20
1.3	Применение модифицирующих добавок и отходов ферросплавного производства для улучшения структуры и эксплуатационных характеристик литого модифицированного бетона	28
1.3.1	Добавки, регулирующие свойства бетонных смесей	30
1.3.2	Применение полимеров в бетонах	45
1.3.3	Предпосылки использования отходов ферросплавной промышленности для улучшения гидрофизических характеристик литых модифицированных бетонов	47
	Выводы по главе 1.	50
2	**КЛАССИФИКАЦИЯ ИСХОДНОГО СЫРЬЯ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ СТРАТЕГИЯ**	51
2.1	Методы исследования	51
2.1.1	Получение тонких фракций клинкерного компонента	52
2.1.2	Моделирование упаковок и расчет оптимальной гранул метрии	54
2.1.3	Рентгенофазовый анализ	54
2.1.4	Исследование физико-механических характеристик бетонных образцов	55
2.1.5	Испытание литого модифицированного бетона на морозостойкость	58
2.1.6	Определение водопоглощения и водонепроницаемости бетона	59
2.1.7	Определение коррозионной стойкости бетонных образцов.	60
2.2	Классификация исходных материалов	61
2.2.1	Портландцементный клинкерный компонент	61
2.2.2	Крупный и мелкий заполнитель	63
2.2.3	Вода затворения	64
2.2.4	Пластифицирующая добавка поликарбоксилатная «AR 122»	64
2.2.5	Полимерная добавка «Повидон-К30»	65
2.2.6	Отход ферросплавного производства - микросилика МК-95	66
2.2.7	Микроармирующие волокна в виде полипропиленовой фибры	66

3	**УСЛОВИЯ И ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СОСТАВА ЛИТОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТХОДОВ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**	68
3.1	Научные и технологические предпосылки для модифицирования литого бетона	68
3.2	Разработка состава литого модифицированного бетона с отходом ферросплавного производства путем применения критериев профессора Окамуры	71
3.3	Разработка сбалансированной композиции трехфракционного вяжущего с управляемым гранулометрическим распределением через программу DropAndRoll	76
3.4	Оптимизация состава литого модифицированного бетона на основе ортогонального центрального плана второго порядка	83
	Выводы по главе 3.	86
4	**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНОГО МОДИФИКАТОРАНА ПАРАМЕТРЫЛИТОГО МОДИФИЦИРОВАННОГОБЕТОНА**	88
4.1	Анализ фазового состава и микроструктуры гидратационных продуктов трехфракционного цементного клинкера с использованием гиперпластификатора, полимера и аморфного диоксида кремния (микросилики)	88
4.2	Рассматриваемые составы литого модифицированного бетона с учетом дозировки и подбора исходных материалов	96
4.3	Технологические и реологические свойства смесей разработанных составов литого модифицированного бетона	97
4.4	Физико-механические характеристики разработанного литого модифицированного бетона	98
4.4.1	Предел прочности на сжатие	99
4.4.2	Предел прочности бетона на растяжение при изгибе	100
4.4.3	Трещин стойкость структуры литого модифицированного бетона	102
4.5	Гидрофизические показатели литого модифицированного бетона	106
4.6	Коррозионная стойкость ЛМБ	110
	Выводы по главе 4	112
5	**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ РАБОТЫ ПО ВНЕДРЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОГО ЛИТОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА**	115
5.1	Технологическая эффективность литого модифицированного бетона на основе полифракционного вяжущего с отходом ферросплавного производства	115

5.2 Экономическая эффективность применения разработанного состава литого модифицированного бетона с комплексной добавкой и диоксидом кремния 116
5.3 Опытное внедрение эффективного литого модифицированного бетона в производство железобетонных лотков дорожных и оросительных 119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 124
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 125
ПРИЛОЖЕНИЯ 136

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертационной работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 30515-2013 «Отбор проб цемента».

ГОСТ 30744-20019 «Нормальная густота 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 30108-94 «Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов».

ГОСТ 8735–88 «Характеристики песка».

ГОСТ 8269.0-97 «Свойства гранитного щебня».

ГОСТ 23732-2011 «Оценка воды затворения».

ГОСТ 30459-2008 «Оценка эффективности действия модифицирующих добавок».

Метод лазерной гранулометрии «Анализ гранулометрического составапорошкообразных материалов».

Метод математического планирования эксперимента методом ортогонального планирования второго порядка «Оптимизация состава бетонной смеси».

Программный комплекс на основе модифицированного метода DropAndRoll «Моделирование упаковок зернистых систем и расчет оптимальной гранулометрии».

ГОСТ 10181-2014 «Отбор пробы бетонной смеси».

ГОСТ 10181-2014– Определение удобоукладываемости бетонной смеси.

ГОСТ 10181-2014Определение средней плотности бетонной смеси

ГОСТ 10180-2012Прочность бетона на сжатие.

ГОСТ 10180-2012 - Проведения испытаний растяжение призмы при изгибе.

ГОСТ 29167-21 - Определение характеристик трещиностойкости

ГОСТ 12730.5-2018 - Определение водонепроницаемости бетона

ГОСТ 12730.3-2020 - Определение водопоглощения бетона

ГОСТ 31383-2008Определение коррозионной стойкости бетона

СНиП 2.04.01-85 - Внутренний водопровод и канализация зданий

СНиП 12-04. Расчет опалубки для бетонирования ЛМБ должен учитывать полное гидростатическое давление бетона на опалубку.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

Литой модифицированный бетон: Бетон, изготовленный из бетонной смеси, способной уплотняться под действием собственного веса.

Тяжелый бетон: Бетон на цементном вяжущем с плотными мелким и крупным заполнителями, средней плотности 2000—2500 кг/м³.

Мелкодисперсная часть (порошковая часть): материал в составе с размером частиц менее 0,125мм.

Примечание - Фракции этого размера включают цемент, минеральные добавки и мелкие фракции заполнителей (соответствующие по зерновому составу минеральной добавке).

Заполнители: зернистые природные или искусственные каменные сыпучие материалы. В зависимости от размера зерен заполнители делят на мелкий заполнитель - до 5 (3) мм и крупный заполнитель – свыше 5(3)мм.

Плотный заполнитель: заполнитель из материала со средней плотностью зерен в пределах от 2000 до 3000 кг/м^3, определенной по ГОСТ 8269, ГОСТ8735.

Легкий заполнитель: заполнитель из материала, имеющий плотность зерен, ниже 2000 кг/м^3 или насыпную плотность ≤1250 кг/м^3 по ГОСТ9758.

Добавки: продукт, вводимый в бетонные и растворные смеси с целью улучшения их технологических свойств, повышения строительно-технических свойств бетонов и растворов и придания им новыхсвойств.

Химические добавки: добавки органического или неорганического происхождения, применяемые для регулирования изменения самих свойств бетонной смеси и бетона, в виде водного раствора или эмульсии, а так же для направленного изменения скорости твердения бетона ирастворов.

Минеральные добавки (микронаполнители): дисперсные (как правило, менее 0,125мм) инертные и пуццолановые добавки, неорганические природные или искусственные материалы, которые могут вводиться в бетонную смесь, в составе части вяжущего и/или мелкого заполнителя, в т.ч. для получения специальных свойств: для повышения и поддержания связности и устойчивости к расслоению. Применение таких добавок также позволяет регулировать расход цемента для снижения теплоты гидратации и уменьшения термическойусадки.

Подвижность: один из показателей, характеризующих удобоукладываемость бетонной смеси, оцениваемый по осадке (ОК) или расплыву конуса (РК), отформованного из бетоннойсмеси.

Заполняющая способность: способность свежеуложенной бетонной смеси заполнять все пространство опалубки под действием силытяжести.

Устойчивость к расслаиванию (устойчивость к расслоению): способность бетонной смеси сохранять однородность состава.

Расплыв конуса: средний диаметр расплыва бетонной смеси при использовании конуса для определения ееподвижности.

Тиксотропность: склонность материала (например, ЛМБ) к прогрессирующей потере текучести в состоянии покоя и восстановлению текучести при приложении энергии.

Формуемость: способность свежеуложенной бетонной смеси протекать через труднопроходимые узкие места, например, между стальными арматурными стержня- ми без расслоения иблокировки.

Время прохождения через воронку: период времени в течение которого порция бетонной смеси объемом 10 литров истечет через стандартную V-образную воронку.

Стабильность: способность бетонной смеси сохранять заданные характеристики в условиях незначительного изменения свойств или содержания сырьевых материалов.

Вязкость: сопротивление течению материала (например, смеси ЛМБ) в начальный моментвремени.

Примечание - У ЛМБ вязкость определяется скоростью расплыва T_{500} при испытании на расплыв конуса или временем протекания в испытании с использованием V- образной воронки.

Текучесть: свободный расплыв бетоннойсмеси.

Ложное схватывание цемента: преждевременная частичная или полная потеря подвижности цементным тестом, устраняемая с помощью механического воздействия.

Лежалый цемент: цемент, сроком хранения более 6 месяцев. При просеивании пробы цемента сквозь сито с сеткой № 008 проходит менее 85 % массы просеиваемой пробы.

Менеджмент качества - скоординированная деятельность по руководству и управлению организацией применительно к качеству.

Несоответствие –невыполнениетребования.

Обеспечение качества - часть менеджмента качества, направленная на создание уверенности, что требования к качеству будутвыполнены.

План качества - документ, определяющий, какие процедуры и соответствующие ресурсы, кем и когда должны применяться к конкретному проекту , продукции, процессу иликонтракту.

Контроль качества – комплекс мероприятий и нормативных документов, направленных на поддержание качества (услуги) на заданномуровне.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей диссертации применяются следующие обозначения и сокращения:

ЛМБ – литой модифицированный бетон

ЛБС - литая бетонная смесь

НТД – нормативно-техническая документация

СМК – система менеджментакачества

F – площадь, $м^2$

Т – время, сек.

V – объем, $м^3$

t – температура, ^0C

W – влажность, %

Пл – плотность, $кг/м^3$

φ– относительная влажность воздуха, %

ε – деформация усадочная, мм/м

С – отношение кремнеземистого компонента к вяжущему

τ–пластическая прочность, Па

η–коэффициент теплопроводности, $Вт/м\cdot^0C$

$К_{мрз}$–коэффициент морозостойкости

Е – динамический модуль упругости, (ДМУ), МПа

σ–напряжение, Па

$R_{сж}$–прочность бетона на сжатие, МПа

$R_{изг}$–прочность бетона на растяжение при изгибе, МПа

В/Т– водотвердое отношение

ПАП-1– пудра алюминиевая

НЯБ–неавтоклавный ячеистый бетон

ЭТФШ– электротермофосфорный шлак

$S_{уд.}$–удельная поверхность, $см^2/г$

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В строительной отрасли к литым модифицированным бетонам предъявляются высокие эксплуатационные требования, охватывающие широкий спектр эксплуатационных характеристик, среди которых особое внимание уделяется прочностным характеристикам, способности материала противостоять влаге, стойкости к повторному замораживанию и оттаиванию, способности сохранять целостность при взаимодействии с агрессивными веществами [1]. Многочисленные исследования продемонстрировали возможность усиления строительных конструкций путем использования полимерных добавок с высокой химической стойкостью [2]. Однако из-за высокой себестоимости производства полимербетоны не получили массового применения, в результате чего традиционные бетонные смеси по-прежнему остаются основным конструкционным материалом в строительстве. В европейских странах разработка и внедрение конструкций из монолитного модифицированного бетона достигли значительного уровня: имеются как обширные экспериментальные данные, так и успешно действующие технологии производства. На территории Республики Казахстан данное направление пока остается на стадии научных исследований и местных производственных испытаний, не получив широкого промышленного использования [3]. Исходя из этого, задача разработки литых модифицированных бетонов с повышенной стойкостью к агрессивным средам путем целенаправленного изменения их внутренней структуры представляется актуальной и практически значимой.

Для достижения этой цели ключевой задачей является создание литой модифицированной бетонной конструкции высокой плотности, обеспечивающей сбалансированное сочетание технологических показателей и эксплуатационной надежности. Это достигается за счет использования дисперсно-дифференцированных связующих компонентов, способствующих плотной упаковке частиц в каждом локальном микрообъеме материала, в сочетании с применением сложных многокомпонентных модификаторов [4-5].

Исследование проводилось в рамках Государственной программы индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2020-2025 годы.

Степень разработанности темы. Анализ научных трудов отечественных и зарубежных исследователей, а также действующих нормативно-технических документов выявил устойчивый интерес к проблемам повышения долговечности бетонных материалов, особенно в условиях агрессивного внешнего воздействия. Поэтому особое внимание уделяется стратегиям повышения устойчивости путем оптимизации состава и структуры цементных систем. Несмотря на значительный объем исследований в смежной области, тема формирования литых модифицированных бетонов с использованием полифракционных цементных систем, в которых осуществляется строго

контролируемая гранулометрия, а также с использованием композиционного модификатора, состоящего из трех компонентов (включающий суперпластифицирующий агент, полимерную составляющую и микрокремнезем), остается научно недостаточно разработанной. Это особенно очевидно в контексте изучения того, как данная модификация влияет на закономерности структурной самоорганизации цементной матрицы, а также на конечные потребительские и физико-химические параметры затвердевшего композитного материала.

Научная гипотеза. Вероятнее всего, залогом формирования литого модифицированного бетона с высокой прочностью, устойчивостью к трещинам, морозу, влаге и агрессивным воздействиям является детальный контроль фракционного состава цементной составляющей в совокупности с воздействием трехкомпонентного модификатора. Предполагается, что такое инженерное соединение инициирует формирование пространственно-упорядоченной микроструктуры с выраженной кристалличностью и плотной упаковкой элементов, за счет чего достигается высокая структурная стабильность и длительная эксплуатационная надежность композита. Присутствие микрокремнезема в системе усиливает развитие вторичной пуццолановой реакции, в результате которой образуются химически стойкие гидросиликаты кальция низкого давления типа CSH(B). Это, в свою очередь, обеспечивает дальнейшее повышение коррозионной стойкости материала при работе в агрессивных условиях.

Цель и задачи исследования. Диссертация посвящена созданию научно обоснованного и технологически реализуемого подхода, позволяющего получать литой бетон с модифицированной структурой, способный эффективно функционировать в агрессивных условиях эксплуатации. Ключевым компонентом данного подхода является введение полифракционного связующего с контролируемым распределением зерен, в состав которого входит трехкомпонентный модификатор — комбинация гиперпластификатора, полимерной добавки и микрокремнезема. Предполагается, что такой комплекс должен обеспечить необходимые показатели производительности и эксплуатационной надежности готового материала.

Для выполнения этой задачи планируется поэтапно рассмотреть следующие направления исследований:

- определение наиболее оптимального состава цементного вяжущего, позволяющего добиться максимальной плотности основания на микроуровне;
- получение литой бетонной системы с целенаправленно модифицированной структурой, сочетающей полифракционную вязкую основу и трехкомпонентный модификатор, а затем оценка влияния такого состава на технологические показатели смеси;
- детальное исследование влияния сложного модификационного состава и совокупного эффекта вяжущего, распределенного по фракциям, на

структурную эволюцию цементного камня и конечные физико-механические показатели уложенного бетона;

- разработка прикладного алгоритма адаптации полученного бетонного материала к условиям массового производства с последующим его целевым использованием при возведении элементов конструкций, работающих в агрессивных средах, включая обязательную техническую проверку его эффективности и анализ эксплуатационной надежности на инженерном уровне.

Объектом исследования является разновидность литого бетона с заданными модифицирующими характеристиками, характеризующийся полифракционной структурой и получаемый на основе цементного вяжущего с добавлением трех функциональных добавок – суперпластификатора, полимерного компонента и микрокремнезема. Основное назначение материала связано с его использованием в строительных проектах, осуществляемых в условиях интенсивной эксплуатации.

Предметом исследования является ряд параметров, определяющих как внутреннюю организацию структуры, так и эксплуатационные свойства модифицированного литого бетона. Полифракционная связующая система изучает влияние комбинации тонкодисперсных компонентов и модификаторов на свойства бетона, уделяя особое внимание прочности бетона, влаго-, морозостойкости и стойкости к агрессивным средам за счет высокой плотности оболочки.

Научная новизна. Разработан научно-обоснованный метод получения литого модифицированного бетона, основанный на использовании полифракционного цементного вяжущего с контролируемой гранулометрией, способствующей формированию плотной пространственно-упорядоченной структуры цементного камня.

Установлено влияние трехкомпонентного модификатора (суперпластификатор АП-122, поливинилпирролидон, микрокремнезем МК-95) на интенсификацию процессов гидратации и образование устойчивых гидросиликатов кальция типа CSH(B), обеспечивающих повышенные прочностные и эксплуатационные характеристики материала.

Впервые экспериментально подтверждено формирование равномерной микрокристаллической структуры цементного конгломерата с поровой системой диаметром 0,1–0,5 мкм, что обеспечивает снижение водопоглощения до 2,1% и повышение морозостойкости бетона до F600.

Предложен новый состав литого модифицированного бетона, обеспечивающий прочность при сжатии до 66,1 МПа и водонепроницаемость до уровня W12, что подтверждает его эффективность для эксплуатации в агрессивных средах.

Разработан и внедрен нормативный технический документ (ТР «ЛМБ2022»), регламентирующий применение модифицированного литого бетона в промышленном строительстве.

Теоретическая и практическая значимость работы. На основании проведенных исследований получены новые сведения о механизме структурообразования бетонов, полученных с использованием полифракционных вяжущих и сложных тройных смесей (содержащих суперпластификаторы, водорастворимые полимеры и аморфный кремнезем) с контролируемым составом по гранулометрическому составу. Установлено, что создание микрокристаллической структуры в цементной матрице и максимизация плотности упаковки твердой фазы улучшают физико-механические свойства литого модифицированного бетона.

Разработанный в рамках данного исследования материал является результатом целенаправленной адаптации литого модифицированного бетона к условиям эксплуатации в высокоагрессивных средах. Представленная в работе композиция была создана не только как химико-технологическое решение, но и как инженерный ответ на вопросы устойчивого развития. Полученная смесь обладает рядом свойств, обеспечивающих ее пригодность для использования в сложных условиях: показателипрочности достигают 66,1 МПа при сжатии и 7,8 МПа при изгибе. Значение коэффициента интенсивности деформации, показывающего способность материала противостоять росту трещин, составляет 0,07467 МПа х Мº. При этом водопоглощение снижается до минимума — не более 2,1%. Материал успешно проходит класс водонепроницаемости, достигая уровня W12, а морозостойкость подтверждена на уровне F600. Кроме того, стоит отметить его устойчивость к разрушительному воздействию химических веществ, что важно при использовании в инфраструктуре, подверженной коррозии.

В процессе практического применения предлагаемой технологии на производственном уровне разработан и вступил в силу нормативный документ - положение «Модифицированный литейный бетон на основе полифракционного вяжущего с добавлением композиционных модификаторов и техногенных компонентов, образующихся при производстве строительных ферросплавов». Указанный документ - ТР 250117-1412-21022004-2024 - утвержден под наименованием ТР «ЛМБ2022» и выступает в качестве основной технологической основы, обеспечивающей дальнейшее внедрение разработки в промышленную практику.

Методология и методы диссертационного исследования. Для проведения диссертационного исследования выбран подход, основанный на интеграции нескольких научных правил, отражающих принципы создания конкретных материалов с заданными эксплуатационными параметрами. Теоретической основой является концепция системного анализа в области материаловедения, позволяющая определить взаимосвязь между структурным строением, составом компонентов и физико-механическими свойствами конечного продукта. Комплексность экспериментальных процедур обеспечивается применением проверенных инструментов научного анализа. К ним относятся методы рентгеновского фазового контроля, детальное

сканирование микроструктуры, химические испытания, а также лазерная гранулометрия, используемые в сочетании с математической обработкой данных. Такой синтез позволил эффективно подобрать параметры мелкодисперсных частиц цементного компонента с учетом усадочной плотности частиц и их геометрических свойств, что в дальнейшем определило структурную устойчивость и прочность получаемой матрицы.

Положения, выносимые на защиту:

- Научная проверка возможности достижения высоких эксплуатационных показателей литого бетона основана на введении особой рецептуры цементного вяжущего с регулируемой структурой зерна и максимальной плотностью упаковки, а также использовании смеси поликарбоксилата, полимера и микрокремнезема как единой комплексной модификационной системы.

- Системные результаты, полученные в результате поэтапного изучения синергетического эффекта тройного модификатора, сосредоточены на его влиянии на стадии структурообразования, микроморфологии и конечных свойствах цементного камня и композита в целом.

- Эмпирическое установление зависимости критических прочностных характеристик, в том числе прочности на сжатие, изгиб, а также светостойкости, показателей циклического замораживания и химического разрушения, напрямую связана с изменением состава модифицирующей смеси в многокомпонентной системе на основе тонкодисперсного минерального вяжущего.

- Проведение аналитической оценки технико-экономической эффективности разработанных рецептур литейных материалов, а параметры внедрения в производство спроектированы с учетом затрат, ресурсоэффективности и рентабельности.

Степень достоверности результатов. Центральным элементом обоснования надежности результатов является набор факторов, минимизирующих влияние случайных и непостоянных искажений. Основным условием является использование высокоточных исследовательских и измерительных приборов, которые стабильно работают во многих испытаниях. Используемые методы контроля основаны на проверенных процедурах измерения, которые обеспечивают доверительный интервал не менее 0,96. Кроме того, для интерпретации полученных данных были использованы методы математического и статистического анализа, что позволило выявить закономерные зависимости и исключить статистически незначимые отклонения. Все это создает прочную основу для надежного подтверждения достоверности проведенных исследований в комплексе. Проверка работоспособности технических решений в ходе экспериментальных испытаний и проведение практических испытаний бетонов, разработанных для эксплуатации в жестких условиях, дали хорошие результаты.

Апробация работы. Основное содержание и выводы диссертационного исследования были проверены на научном форуме: II Международная

конференция «Промышленное строительство» (Алматы, 2025 г.). III Научно-практическая конференция «Особенности проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений с активной сейсмозащитой» (Алматы, Нао Руннит, 2024 г.) Международная научно-практическая конференция «Особенности проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений с активной сейсмозащитой» (Алматы, Нао Руннит, 2024 г.) Практическая конференция «Перспективы современного производства энергосберегающих строительных материалов» (Ташкент, 2023 г., Ташкент).

Внедрение результатов исследования. Промышленное внедрение разработанного литого модифицированного бетона осуществлено на предприятии «Темирбетон-1» при производстве железобетонных изделий: изготовлены 200 лотков серии Л9-11 и 100 лотков оросительных систем типа ЛР-6.

Личный вклад соискателя. Кандидат сформулировал цели и задачи своего диссертационного исследования, выбрал методы тестирования, а также проанализировал и интерпретировал полученные результаты. Для обеспечения плотной упаковки мелкой фракции клинкерных компонентов особое внимание уделялось исследованию зернового состава цементного вяжущего, что реализовывалось с помощью программно-вычислительных комплексов с использованием математических алгоритмов. Состав модифицированной бетонной смеси был оптимизирован с целью улучшения физико-технологических свойств. Рекомендации по применению бетона в суровых условиях. В научных изданиях выпускались публикации по темам исследований.

Публикации.Обобщенные правила диссертационного исследования нашли отражение в шести научных работах: две из них опубликованы в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень, утвержденный Комитетом по качеству науки и высшего образования Республики Казахстан, три – в международных журналах, зарегистрированных в базе цитирования Scopus., аоставшиеся один патент получен на полезную модель

Объем и структура диссертации. Объем диссертации составляет 183 страницу, включая структурные элементы, предусмотренные Академическим стандартом: оглавление, вводную часть, основной доклад в пяти тематических главах, заключительное заключение, библиографический список, содержащий 137 источников, и одно приложение. Иллюстративный материал представлен в виде 41 таблицы и 25 графических схем и рисунков.

ГЛАВА I СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ применения литых модифицированных бетонов для строительства

В отличие от типичных тяжелых бетонов, используемых в массовом строительстве, к ЛМБ предъявляются различные требования в зависимости от их конкретных функций и характера применения. ЛМБ должен обладать максимальной текучестью и самозаполняемостью, обеспечивая свободное и равномерное заполнение любой конфигурации без привлечения вибрационных устройств. При этом материал должен сохранять высокую степень внутренней структурной целостности и однородности, не допуская локальной неоднородности или разделения компонентов. Эти требования можно разделить на несколько групп:

1. Реологические характеристики: Подвижность и текучесть – обеспечивают свободное растекание смеси под действием собственного веса, без образования расслоений. Стабильность (сегрегационная устойчивость) – предотвращает расслоение смеси, оседание крупных частиц заполнителя и образование цементного молока. Водоудерживающая способность – снижает риск водоотделения, особенно при транспортировке и укладке [6].

2. Состав и свойства смеси: Оптимальный гранулометрический состав заполнителя – крупный и мелкий заполнитель должны обеспечивать плотную укладку без образования пустот. Использование эффективных модификаторов для снижения водоцементного отношения, мелкодисперсные добавки для контроля сегрегации [7].

3. Прочностные и эксплуатационные характеристики: Высокая прочность на сжатие – соответствует классу бетона по проектным требованиям (обычно от В30 и выше). Морозостойкость – выдерживает циклы замораживания-оттаивания без снижения эксплуатационных свойств. Водонепроницаемость – снижает фильтрацию воды через бетонную массу, предотвращая разрушение конструкции. Стойкость к химическим воздействиям – особенно актуальна для гидротехнических сооружений, промышленных объектов и дорожного строительства [8].

4. Технологические требования: Устойчивость к длительному хранению и транспортировке – бетонная смесь не должна терять подвижность и однородность в процессе доставки. Совместимость с арматурой – хорошая обеспечение надежного сцепления без необходимости вибрационного уплотнения. Скорость набора прочности – важна для сокращения сроков строительства и раннего снятия опалубки [9].

Эти требования определяют не только качество литых модифицированных бетонов, но и их эффективность в строительстве, особенно в сложных и ответственных конструкциях.

Тонкостенные общестроительные конструкции (толщиной до 15 см) особенно подвержены воздействию агрессивных факторов, таких как высокоминерализованная вода, в том числе грунтовая, а также суточные и сезонные колебания температуры и влажности.

Эти неблагоприятные условия снижают прочность и долговечность сооружений, вызывая прогрессивное развитие дефектов и приводя к разрушению конструктивных элементов.

Поэтому постоянно ведется поиск эффективных материалов, способных противостоять как механическим нагрузкам, так и агрессивному воздействию окружающей среды. Одним из направлений является разработка и применение современных строительных композиций, обеспечивающих высокую прочность и долговечность конструкций [10].

Однако многие полимерные материалы, предлагаемые в качестве альтернативных решений, требуют использования дорогостоящих химических компонентов, что серьезно ограничивает их массовое применение. В результате бетонные материалы на основе портландцемента и клинкера остаются преобладающим материалом, используемым в строительстве, и постоянно совершенствуются за счет изменения пропорций смесей и технологических подходов [11]. Для повышения эффективности строительного процесса необходимо не только стремиться к повышению качества работ, экономии времени и снижению затрат, но и рационально использовать свойства применяемых материалов для повышения уровня надежности и эксплуатационной устойчивости.

При возведении различных общестроительных объектов, включая транспортные сооружения и инфраструктуру, промышленные и гражданские здания, склады, ремонтные мастерские и гидротехнические конструкции, важным фактором остается выбор материалов, обладающих высокой прочностью, стойкостью к внешним воздействиям и экономической целесообразностью.

Комплексный подход к строительству, включающий применение современных строительных технологий и эффективных материалов, позволяет повысить долговечность сооружений, снизить эксплуатационные затраты и оптимизировать процессы возведения объектов [13].

Здания и сооружения, возводимые в суровых климатических условиях, как правило, проектируются и возводятся с использованием обычных строительных материалов, методов укладки и уплотнения тяжелых бетонных смесей, конструктивных решений, применяемых на типовых объектах гражданского строительства и промышленности. Исключением из этого подхода являются крупные или технически сложные инженерные системы, построенные в специфических природных условиях. В зависимости от требований строительства и условий эксплуатации подобные объекты требуют индивидуальных проектных решений и выбора строительных материалов с высокими показателями плотности, прочности и длительного срока службы.

Рисунок 1.1. Пример железобетонной конструкции (стена) с недоуплотнением

Для повышения надежности и продления срока службы таких конструкций перспективным решением является применение литого модифицированного бетона (ЛМБ). Благодаря высокой текучести и способности заполнять форму без вибрационного уплотнения, ЛМБ образует плотную и однородную структуру с минимальным количеством пор и трещин. Это значительно сокращает время укладки бетона, улучшает однородность по высоте, увеличивает стойкость бетона к агрессивным средам, снижает риск растрескивания и повышает долговечность конструкций.

Использование литых бетонов с повышенными эксплуатационными характеристиками в строительстве позволяет создавать более надежные и устойчивые к внешним воздействиям сооружения, сокращая необходимость в частом ремонте и восстановительных работах [15].

Использование даже минимальных количеств модифицирующих добавок способно оказать существенное влияние на механизм структурообразования, способствуя созданию бетонных материалов с повышенной прочностью и улучшенными физико-механическими свойствами. В строительной отрасли широко применяются модификаторы, сочетающие химические и минеральные компоненты, которые позволяют формировать плотные и стабильные во времени конструкции, обладающие реальной эксплуатационной надежностью.

Приборы неразрушающего контроля прочности и численные исследования методом конечных элементов позволяют оценить техническое состояние железобетонных изделий по следующим параметрам:

- геометрические характеристики конструкций и их сечений;
- наличие, размеры трещин и отколов;
- величины деформаций и прогибов;
- прочность сцепления арматуры с бетоном после длительной эксплуатации;
- целостность арматуры, наличие разрывов;
- степень коррозионного повреждения бетона и металлической арматуры.

В условиях эксплуатации железобетонных конструкций, расположенных на юге Казахстана и непосредственно подвергающихся воздействию агрессивных сред, на материал в совокупности воздействует множество неблагоприятных факторов. Среди них следует отметить высокую минерализацию воды, в том числе подземных источников, а также сильный кавитационный эффект, возникающий при движении водных масс на фоне суточных и сезонных изменений температуры и влажности. Кроме того, существенное влияние оказывают частые перепады температур выше нулевой отметки. Постоянное воздействие таких агрессивных факторов постепенно снижает надежность инженерных конструкций и ускоряет прогрессирование процесса разрушения железобетонных элементов (см. рисунок 1.2).

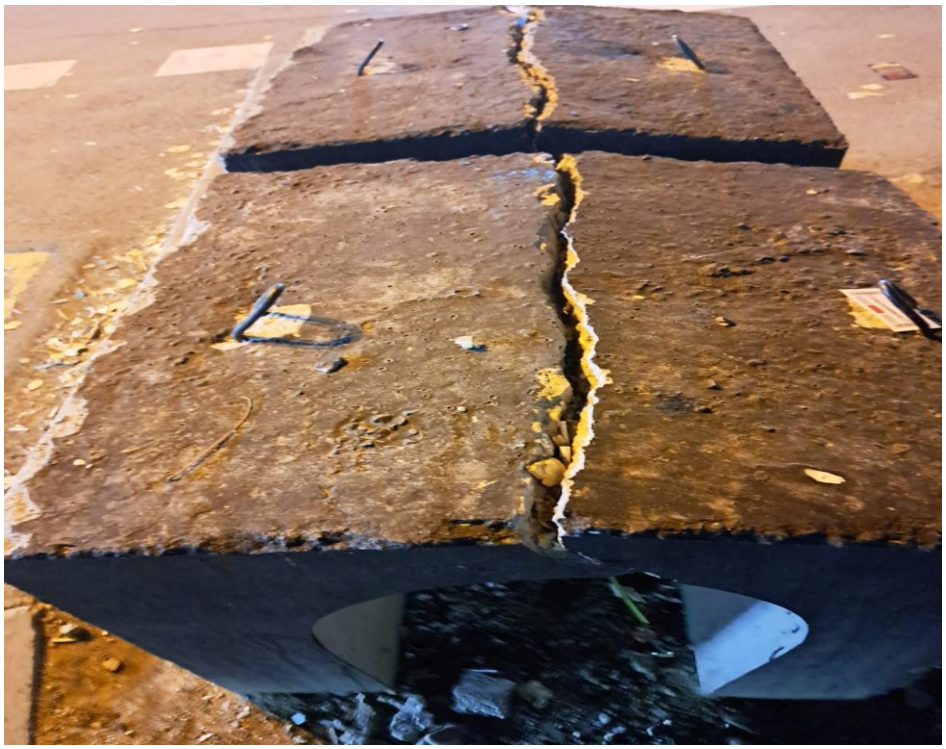


Рисунок 1.2 - Разрушение бетона с защитным покрытием под действием агрессивной среды.

Поэтому прогрессивно увеличивается количество дефектов, что в свою очередь, ведет к значительным потерям прочностных характеристик (рисунок 1.3).

Рисунок 1.3 - Разрушение бетона вследствие неправильной эксплуатации.

Одним из возможных путей повышения срока службы и устойчивости железобетонных конструкций из тяжелого бетона является применение специальных покрытий с защитными свойствами. Данные покрытия могут быть выполнены в виде монолитных или составных элементов и предназначены для уменьшения проникновения влаги в рабочую поверхность. Использование таких защитных слоев может ограничить проницаемость до 15-20%[18]. Однако эффективность таких систем снижается из-за их низкой механической прочности. Особенно это касается тонких покрытий толщиной около 0,2 мм, которые легко разрушаются даже при малейших механических воздействиях. Эта уязвимость ограничивает его надежность при долгосрочном использовании (см. рисунок 1.2).

Актуальность исследования заключается в том, что исследований, посвященных внедрению литых модифицированных бетонов, не требующих виброуплотнения, изучению морозостойкости и анализу гидрофизических свойств бетонов работающих в условиях воздействия агрессивной среды очень мало, в этих работах в основном рассматривается вопрос о изучении прочностных и деформативных показателей с отражением решения одной или двух определенных задач, к примеру (решения проблемы трещиностойкости и усадки бетона)[19].

Для формирования бетонных смесей с заданной текучестью и требуемыми эксплуатационными свойствами затвердевшего бетона рекомендуется использовать модифицированные комплексы, сочетающие химические и минеральные компоненты [20]. В этом смысле обеспечение высокого качества бетонных материалов, используемых в гражданском и гидротехническом строительстве, остается важной научной и инженерной задачей. Решение предполагает внедрение технологических подходов, соответствующих современному уровню развития отрасли. В основе такого решения лежит использование полифракционных структурных цементных вяжущих, дополненных комплексной системой преобразования. К последним относятся высокоэффективные суперпластификаторы, органические полимерные добавки, а также вторичное искусственное сырье, получаемое в качестве побочных продуктов на предприятиях ферросплавной промышленности диоксида кремния. В дальнейшем рекомендуется поэтапно рассмотреть каждый компонент цементного состава и проанализировать его функциональный вклад в формирование литого бетона с высокой прочностью, низкой проницаемостью и стойкостью к внешним воздействиям.

1.2 Регулирование внутренней структуры вяжущих материалов с учетом топологической неопределенности

Оптимизация свойств вязких компонентов напрямую связана с необходимостью понимания структуры вязких компонентов через призму топологического анализа с геометрической интерпретацией многокомпонентной системы. В этом подходе вязкая составляющая интерпретируется как объемно-пространственная структура, включающая как первичные частицы в виде отдельных частиц, так и вторичные кристаллические структуры, образующиеся в процессе гидратации. Эти структурные элементы имеют количественные параметры, которые не поддаются непрерывным преобразованиям, так называемые топологические инварианты. Они определяют важнейшие свойства материала: плотность, развитость пористой структуры и степень внутренней адгезии [21].

Для описания вязких систем, проявляющих признаки структурного беспорядка, целесообразно использовать положения обобщенной теории дисперсных сред. Эти материалы представляют собой сборки с раздельными внутренними структурами, включающими сжатые конденсированные фазы и цементно-ориентированные композиции. При анализе пространственной организации необходимо учитывать основные особенности, присущие упорядоченной кристаллической решетке, а также характерные для аморфных или менее упорядоченных дисперсных систем:

Плотность упаковки элементов – параметр, описывающий степень заполнения объема структурными компонентами, количественно выражаемый отношением ≤ 1.

Координационное число (Z) – среднее число контактных взаимодействий между частицами, определяющее механическую стабильность структуры. Таким образом, изучение вяжущих систем с позиций топологического беспорядка позволяет формировать оптимальные структурные характеристики для повышения плотности, прочности и долговечности бетонов [22].

Топологические модели хаотически организованных систем основаны на анализе пространственного распределения частиц дисперсной фазы и расстояний между ними, при этом основным параметром является плотность упаковки соседства. Композиционные материалы, в отличие от сухих дисперсных материалов, характеризуются высокой плотностью частиц, что объясняется действием межфазных сил, особенно поверхностного натяжения на границе твердой и жидкой составляющих.

Одним из основных топологических индексов является координационное число Z, которое представляет собой число элементов, находящихся в непосредственном контакте с выбранной центральной частицей. В случае вяжущих систем этот показатель напрямую зависит от устойчивости и плотности образующейся трехмерной структуры и влияет на эксплуатационные и прочностные свойства бетона [23].

Обратите внимание, что величина корректировки по сути является усредненной и напрямую зависит от степени плотности конструкции. Чем плотнее упаковка, тем большее число частиц взаимодействует в ограниченном объеме. На этот показатель влияют не только морфология и фракционный состав частиц, но и геометрические параметры пространства, в котором формируется структура (лабораторная форма, производственная форма или отдельный контейнер). Конфигурация этого критического объема, его размер и форма, а также гранулометрический состав становятся основными контролируемыми переменными, определяющими механизм уплотнения и структурную эволюцию цементного камня. Точная регулировка этих параметров позволяет точно контролировать реологические и прочностные свойства бетонных материалов, что имеет большое значение при проектировании конструкций, работающих в сложных условиях эксплуатации [24].

Использование трехмерных моделей, основанных на положении твердых сфер, является надежным методом исследования дисперсных сред, позволяющим не только визуализировать пространственную структуру, но и количественно оценить диапазон плотностей распределения частиц. Эти модели позволяют точно определить значение координационного числа и степень уплотнения, которые имеют большое значение при проектировании композиционных материалов. За счет равномерного и регулярного расположения сфер в моделируемом объеме достигается максимальный уровень плотности, что положительно влияет на механическую прочность и устойчивость к деформациям конечного изделия.

Топологические исследования дискретных систем направлены на декомпозицию и анализ их структуры с учетом иерархических уровней их организации и свойств элементов, составляющих хаотичную, но функционально значимую пространственную сеть. Такие системы различаются в зависимости от масштаба дискреционных полномочий.

На микроскопическом уровне атомы, молекулы и их соединения образуют различные структуры. Кроме того, на макроуровне он характеризуется наличием плотных и четко определенных агрегатов и объемных блоков, которые играют структурирующую роль.

Процесс механического измельчения зернистых компонентов приводит к разрушению плотных структур. Общая плотность покрытия уменьшается, а координационное число уменьшается. Это происходит из-за увеличения электростатических сил между частицами и перестройки структуры соседних дисперсионных слоев. По мере увеличения степени измельчения нестабильности могут проявляться в виде магнитных и электрических колебаний, особенно если в системе высока доля мелких фаз. Эти явления существенно усложняют стабилизацию данных композитов и затрудняют получение однородных структур, богатых мелкодисперсными наполнителями.

На определенном этапе интенсивности рассеяния происходят внутренние изменения в структуре твердой фазы, которые затрагивают как сам дисперсионный слой, так и области, связанные с матрицей композита. При моделировании термодинамики жидкометаллических систем, определении вязкостных характеристик и прогнозировании поведения сильнодисперсных компонентов в сложных композиционных материалах решающим фактором является величина координационного числа в зернистой структуре структуры [26].

Для достижения более совершенной организации структуры материалов в микро-нанодиапазоне принято прибегать к подходам, основанным на концепциях топологического анализа хаотических систем. Основными характеристиками, характеризующими внутреннюю топологию таких дисперсных сред, являются, с одной стороны, степень нерегулярной плотности расположения частиц, а с другой — величина координационного числа, указывающая на число прямых связей между элементами. Использование топологических подходов для анализа неупорядоченных монодисперсных слоев твердых сфер позволяет определить предельные и критические размеры нано- и микрочастиц, участвующих в формировании структур в дисперсных материалах. Общие закономерности, характеризующие распределение частиц, такие как заполнение полостей и объем, позволяют установить идеальные размеры компонентов системы [27].

В некоторых работах [26] представлены аналитические выражения для расчета координационного числа в нерегулируемой распределенной среде. Одним из основных параметров, используемых для проектирования эффективной дисперсионной структуры, является средняя плотность частиц.

Этот показатель позволяет оценить не только распределение элементов в пространстве, но и характер их взаимодействий. При моделировании плотных расположений атомов с учетом топологических особенностей учитываются также фундаментальные принципы обеспечения структурной устойчивости и плотности в неупорядоченных системах.

Первый из этих принципов основан на уменьшении объема, занимаемого атомами, вследствие действия гравитации между ними. Исходя из принципов квантовой физики и эффекта суперпозиции волновых функций атомных оболочек, элементарные компоненты системы имеют тенденцию быть максимально плотно упакованными в пространстве с наименьшими потерями энергии. Такое поведение способствует увеличению числа связей между элементами (координационного числа), что в свою очередь повышает устойчивость кумулятивных структур, образующихся в дисперсной среде.

Второй принцип основан на равномерном распределении атомов, создаваемом кулоновским отталкиванием. В результате соприкасающиеся частицы стремятся сохранять одинаковое расстояние друг от друга, образуя постоянную пространственную конфигурацию вокруг центрального элемента. По мере уменьшения плотности упаковки внутри кластера устойчивость структуры компенсируется усилением взаимодействия между атомами. Однако при достижении максимальной плотности упаковки наночастиц равномерное распределение зарядов ослабляет связи с центральным атомом, что приводит к уменьшению значения координационного числа [24].

Размер пор и процент частиц, способных плотно заполнить поры, определяют размерные факторы, которые играют ключевую роль в формировании структурной организации дисперсионной системы. В областях, прилегающих к поверхности, а также в группах микро- и атомных размеров устанавливается равномерная пространственная плотность при достижении критического баланса между размерами и концентрациями компонентов. Такая конфигурация помогает поддерживать устойчивое состояние всей системы и обеспечивает структурную однородность в малых масштабах.

В процессе интенсивного помола цемент начинает терять свою первоначальную пространственную упорядоченность: его дисперсная природа переходит в иное топологическое состояние. Чем меньше частицы, тем выше их поверхностная электростатическая активность, что приводит к более выраженным отталкивающим взаимодействиям на микроуровне. При этом переходе внутренняя структура постепенно теряет плотность — образуется система, в которой элементы теряют связи между соседними частицами по мере приближения к идеальным сферам, а твердая фаза переходит в решетчатую и рыхлую конфигурацию. Это приведет к соответствующему снижению плотности штабеля и стопки, что напрямую повлияет на реологические свойства системы. При достижении порога сухого диспергирования сила тяжести частиц становится равной или превышает силу гравитационного осаждения, что определяет предел устойчивости таких структур.

В процессе дисперсии частицы образуют агрегаты разных масштабов, обычно сферической формы. В этом случае средняя плотность упаковки достигает критического значения первого порядка (n anis ≈ 0,2549). Дальнейшее уменьшение размера частиц требует затрат значительной энергии на разрушение расширенных структур и последующее их разрушение. Применяя математические методы структурной топологии, можно отслеживать изменения топологического состояния вязкой цементной системы вплоть до нанометрового уровня на каждом этапе измельчения.

Создание новых композиционных материалов, содержащих твердую и жидкую фазы, требует максимально плотной упаковки твердых частиц в заданном объеме. Поскольку отдельные компоненты композиционного материала имеют различную прочность, общая устойчивость материала к внешним воздействиям зависит в первую очередь от прочности связующей фазы, которая является наиболее слабым элементом в системе. В связи с этим для повышения прочности композиционного материала необходимо уменьшить долю связующего в объемной структуре.

В условиях очень плотной упаковки твердой смеси прочностные свойства материала улучшаются. Уменьшение содержания связующих компонентов в составе композита повышает устойчивость к разрушению. Одним из наиболее эффективных инструментов анализа дисперсных структур является математическое моделирование пространственной конфигурации дисперсных структур на основе твердой сферической системы. При таком подходе задача выбора оптимальной конфигурации композита с максимальной плотностью упаковки заключается в поиске решения основной проблемы сжатия сферических частиц в ограниченный объем. При этом монодисперсные оболочки с одинаковым радиусом для всех частиц были детально изучены как теоретически, так и экспериментально.

Учитывая случайную конфигурацию твердых сфер, их можно интерпретировать как произвольные расположения частиц с постоянной внутренней связностью. Такой подход позволяет достичь максимальной средней плотности упаковки и координационного числа z, которое определяется числом частиц, контактирующих с центральной сферой. Соотношения, описывающие эти свойства, были выведены для различных типов упаковок [22]. В трехмерном пространстве существует пять основных структур: плотные, постоянные суперпозиции различных типов сфер (рис. 1.4), с различной частотой повторения в зависимости от условий конфигурации.

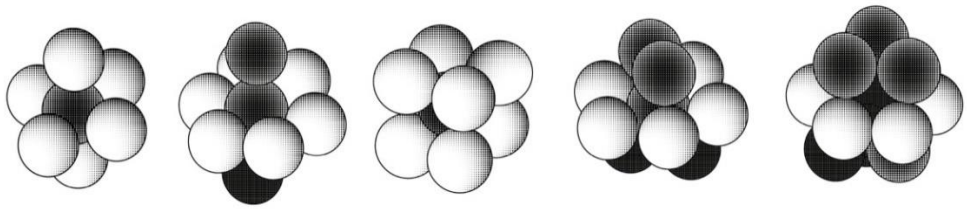


Рисунок 1.4 - Строительные блоки постоянных расположений сфер: 1. Простая кубическая упаковка (рядная) (небо = 0,5236-3, координационное число Z = 6). 2-моногексальная (мономасичная) структура (мо = 0,6046-3, Z = 8); 3-объемная центрированная упаковка (tian = 0,6802-1, Z = 8); 4 – диагональная структура (tian = 0,6981–2, Z = 10); 5 – самое плотное наложение (треугольно-гексагональное с фокусировкой на гранях) (tian = 0,7405–3, z = 12) [22].

Порядок распределения частиц по объему способствует достижению критической плотности упаковки сферических элементов - Ф (доли объема, занимаемой частицами). Это возможно, когда размеры упакованной области значительно превышают радиус частицы. Максимальная плотность упаковки для монодисперсных систем. Это достигается путем нахождения центра сферы путем размещения простых кубов или плотно упакованных шестиугольников. 1.5).

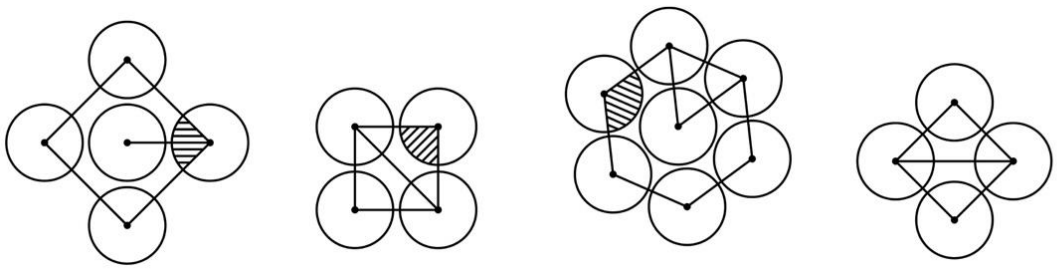


Рисунок 1.5 – Покрытие в двухмерном пространстве: многоугольники и элементарные ячейки [22]

Многочисленные экспериментальные и аналитические исследования подтверждают, что при хаотичном, аморфном распределении частиц плотность упаковки не превышает значения, характерного для неупорядоченных систем. Согласно выводам авторов, достижение высокой плотности упаковки в полидисперсных средах становится возможным при соблюдении определённых соотношений между диаметрами групп частиц. Так, модель идеального заполнения с гексагональной структурой характеризуется отношением диаметров сфер, равным 0,1547 [28]. Формирование дисперсных систем с повышенной плотностью достигается путём использования частиц, размеры которых находятся как минимум в соотношении 1:8, что способствует упорядоченному размещению элементов в структуре [29].

Для практической реализации применена модель последовательного поэтапного заполнения объёма сферическими частицами различного размера, обеспечивающая формирование термодинамически устойчивой полифракционной упаковки.

Первоначально весь объем полученной структуры насыщен крупными сферическими агрегатами условного радиуса, соответствующего максимальной плотности. После развертывания остается пустая система, а затем вводятся более мелкие объекты. Этот каскадный принцип сохраняется: каждый последующий пористый слой, появляющийся после очередной упаковки, дополняется еще более мелкими элементами до конечного минимального значения, за пределами которого дальнейшее сжатие физически невозможно. Такой подход обеспечивает высокую степень уплотнения и стабильность структуры.

Состав полифракционной системы определяется путем моделирования процесса постепенного размещения сфер разного диаметра в ограниченном объеме для достижения максимально возможной плотности упаковки.

Исследование подтвердило правильность предложенного подхода к определению идеального зернового состава. Разработанная модель показывает высокое соответствие расчетных и предлагаемых параметров полифракционной системы, что свидетельствует о ее высокой практической применимости. Увеличение плотности упаковки частиц заполнителя напрямую способствует снижению необходимого количества вязких компонентов в композитной конструкции. Метод подходит как для грузов с непрерывным гранулометрическим составом, так и для смесей с непрерывной структурой частиц. Испытания разработанного решения проводятся в рамках исследований по оптимизации состава заполнителей, используемых в асфальто-цементных смесях [30]. Математическая модель, используемая в данном случае, работает в «идеализированной» системе, рассматривая вязкие частицы как сферические элементы, не принимая во внимание их точную геометрическую форму.

Для корректировки этого предположения используется фактор формы частицы KF, который рассчитывается как отношение площади поверхности идеальной сферы (Fshar) к площади поверхности данной частицы того же объема (FZ). Сферическая частица имеет коэффициент формы, равный 1. Если система частиц имеет значительные угловатые, вытянутые или сплющенные формы, процент минимальной размерной фракции увеличивается с увеличением отклонения от сферической формы [31].

В исследовании [32] обсуждались два подхода к уменьшению внутричастичных пустот. В первом случае используются минеральные порошки с многофрактальным распределением, а во втором — система двойного трения, в которой значительная доля более мелких частиц заполняет межполушарные полости между более крупными однородными частицами.

Для описания гранулометрического состава частиц цемента диаметром более 5 мкм используется зависимость, показывающая связь между их размером и степенью однородности состава:

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

здесь r_0 - это характерный размер цементного зерна, а параметр n служит мерой равномерности распределения частиц по фракциям.

Применение математической экспериментальной теории при проектировании многокомпонентных смесей позволяет формировать регрессионные модели оптимизируемых параметров, подтверждает статистическую достоверность экспериментальных данных при подборе составов, позволяет рассчитывать оптимальные соотношения компонентов в соответствии с технологическими требованиями, а также создавать модели, отражающие качественное и количественное влияние отдельных факторов на физико-механические свойства системы. Кроме того, эти модели могут быть интегрированы в автоматизированные системы управления технологическими процессами производства смесей со специфическими свойствами.

Современное вычислительное материаловедение активно использует приемы методов структурного моделирования (СИМ) и имитационных экспериментов на основе цифровых изображений структурных элементов изучаемой системы. Такой подход позволяет учитывать условия взаимодействия частиц и повторять на компьютере поведение системы при изменении внешних параметров. Метод SIM зарекомендовал себя как эффективный инструмент для решения проблем в материаловедении [31]. В процесс численного моделирования активно вовлекаются современные алгоритмические подходы к созданию трехмерных конструкций, среди которых, например, концепция движущихся фрагментов, реализуемая через схему «Drop and Roll», а также методы, имитирующие поведение твердых тел. Физическая достоверность этих моделей обеспечивается использованием фундаментальных законов механики, основанных на уравнениях движения, вытекающих из принципов Ньютона и Эйлера.

В заключение следует отметить, что основными параметрами, характеризующими упорядоченные кристаллы и неупорядоченные дисперсные системы, являются плотность упаковки частиц и координационное число. При формировании функциональных свойств строительных смесей важное значение имеют параметры, определяющие их физическую прочность и деформационную упругость. В связи с этим предложенный алгоритм исследований, направленных на проектирование полифракционного связующего с высокой степенью сжатия, будет положен в основу следующего этапа – проектирования зернистых структур с контролируемыми свойствами.

1.3 Применение модифицирующих добавок для улучшения структуры и эксплуатационных характеристик литого модифицированного бетона

Одним из основных векторов влияния на структуру и эксплуатационные показатели цементсодержащих смесей является использование модификаторов, способных изменять свойства вязкой фазы на молекулярном и субструктурном уровнях. Речь идет о целенаправленном вмешательстве в механизм формирования композиции с целью существенного снижения затрат и энергозатрат на каждом этапе технологического цикла, а также повышения эксплуатационной долговечности.

Дозировки таких добавок подбираются с высокой точностью и сводятся к минимально необходимому уровню для достижения желаемого инженерного эффекта без ухудшения свойств бетона, раствора или других инъекционных составов. Это позволяет одновременно стабилизировать параметры смеси и изменять ее поведение в конкретных условиях эксплуатации. По принципу действия все добавки условно делятся на две основные группы: химического и минерального происхождения.

К первой категории обычно относятся органические или неорганические вещества, масса которых в системе составляет один-два процента от общей массы вяжущего материала. Несмотря на малые дозы, их участие в процессах гидратации клинкерного компонента вызывает каскадные реакции, кардинально влияющие на скорость и характер кристаллизации цементного геля. Это позволяет гибко регулировать физические и механические свойства конечного продукта.

Минеральные добавки, напротив, вводятся в количестве от 5% до 20% и выше в зависимости от требуемой степени уплотнения конструкции и целевого снижения расхода портландцемента. Эти компоненты, часто в виде порошкообразных неорганических фаз природного или промышленного происхождения, служат не только средством повышения плотности и снижения вязкости, но и решают проблемы утилизации массовых отходов — например, золошлаковых смесей ТЭЦ, побочных продуктов ферросплавов или осажденного морского гранулированного шлака. Таким образом, благодаря их внедрению достигается одновременно несколько целей: экологичность, технологичность и увеличение эксплуатационных резервов.

Современные векторы развития технологий бетона все больше базируются на принципах наноинженерных решений, которые подразумевают включение в состав очень малых частиц – волокнистых и порошковых форматов, размеры которых составляют от единиц до сотен нанометров (в диапазоне 1–200 нм). Использование данных наноструктурированных добавок позволяет целенаправленно влиять на распределение микрофаз и адгезионные взаимодействия в системе, изменяя свойства материала на ранних стадиях его формирования. Использование таких компонентов позволяет контролировать

процессы структурообразования на ультрамикро- и наномасштабных уровнях, гарантирует изменение скорости образования гидратных фаз, улучшает свойства конечного материала и делает его адаптивным к различным технологическим условиям. Использование наносфер в составе строительных композитов возможно в широком диапазоне морфологических форм — от вытянутых нитевидных структур до замкнутых фуллереноподобных конфигураций. Подобные элементы могут существенно влиять на основные характеристики многокомпонентной системы, изменяя как процессы сборки, так и параметры конечного использования материала.

Основой современных научных исследований является формирование концептуальных и практических основ, позволяющих осуществлять правильный выбор конфигураций, свойств и режимов применения наноматериалов, рассматриваемых в качестве основных средств воздействия на поведение вяжущих материалов. Предполагается, что такой целенаправленный подход может послужить основой для эффективного управления эксплуатационными характеристиками конструкций и существенного повышения их долговечности.

Перспективным направлением является исследование возможности использования бентонитовой глины в качестве наномодулятора в бетонных конструкциях для строительства полигонов. Бентонитовая глина состоит из наноразмерных частиц, которые значительно увеличиваются в объеме при смачивании, поэтому ее можно использовать для модификации структуры цементного камня. Действие этого механизма проявляется в существенном повышении прочностных характеристик, улучшении влагозависимых барьерных свойств, повышении эластичности цементных матриц, что имеет особое значение при эксплуатации конструкций в средах с повышенной влажностью и высокой химической агрессивностью. Модифицирующие компоненты, используемые для изменения параметров составов бетонов и растворов, классифицируются по преобладающему функциональному эффекту их воздействия на систему [34]. Класс добавок представляет собой группу веществ, которые оказывают одинаковое влияние на технические свойства новой смеси и эксплуатационные характеристики отвержденного композита.

Типы добавок следующие:

Добавки для регулирования свойств бетонных и растворных смесей:

- Пластификаторы (высокоэффективные водоредукторы, пластификаторы)
- Оборудование для гидрогенизации (оборудование для гидрогенизации, оборудование для гидрогенизации)
- Стабилизаторы;
- Регулирование сохранения мобильности
- Повышенное содержание воздуха (объем газа).

Добавки, изменяющие свойства затвердевшего бетона и раствора:

- Регулировка скорости коагуляции (ускорители, замедлители)

- Увеличение силы.
- Сниженная проводимость
- Улучшенные защитные свойства по сравнению с закаленной сталью.
- Улучшенная морозостойкость
- Улучшенная коррозионная стойкость
- расширение.

Добавки, придающие бетону и раствору особые свойства:

- Защита от замерзания (для холодного и горячего бетона)
- Гидрофобизирующие агенты.

Холодный бетон или раствор — это материал, изготавливаемый с использованием антифризной смеси и предназначенный для затвердевания при температурах ниже нуля. Высокотемпературный бетон получают с использованием противоморозных добавок, которые предотвращают замерзание смеси до тепловой обработки конструкции или изделия.

По механизму взаимодействия со смачивающими компонентами цементного вяжущего минеральные добавки делятся на две категории. К первому (типу I) относятся вещества, способные вступать в химические реакции с продуктами гидратации — так называемые активные минеральные компоненты. Ко второй группе (тип II) относятся материалы, которые не влияют на процессы гидратации, не участвуют в химических превращениях, а оказывают в основном физико-механическое воздействие на структуру и свойства системы.

1.3.1 Добавки, регулирующие свойства бетонных смесей

По степени влияния на водоцементное отношение и текучесть композиционных смесей пластифицирующие добавки классифицируют следующим образом. К категории суперпластификаторов относятся составы, способные преобразовывать консистенцию бетонных смесей от плотной (П1, ОК ~ 2-4 см) до высокоподвижной (П5), а также от минимально подвижных растворов (КР 1, ОК ~ 2-4 см) до уровня РК 4. Пластифицирующие добавки оказывают незначительное влияние, ограничиваясь диапазоном Р2–Р4 для бетона и pk2–pk3 для растворов. При этом увеличение подвижности не должно сопровождаться снижением силы более чем на 5%. Важно помнить, что применение таких смесей иногда сопровождается неблагоприятными явлениями: изменением сроков начала и окончания строительства, возможным расслоением состава, вовлечением воздуха, повышенной подверженностью усадочным деформациям и ползучести.

Использование добавки, удерживающей воду, может сократить количество воды в воротах на 20% и более.

Влагоудерживающие вещества обеспечивают поглощение воды на 7–20%.

Применение гидрофобизирующих смесей способствует уменьшению расслоения смеси, снижению проницаемости, повышению прочности, морозостойкости, коррозионной стойкости, уменьшению усадки и влажности.

Добавки классифицируются по их основному эффекту: пластифицирующему или водопоглощающему.

Особое значение в современной строительной практике имеют научные исследования, направленные на более глубокое понимание свойств и поведения бетона как основного строительного материала. [36]

К числу важных достижений в области строительного материаловедения относится изучение процессов структурообразования на микро-, субмикро- и наноуровне, что способствует значительному повышению прочности и долговечности бетонных материалов. Научные исследования привели к выявлению закономерностей гидратации цементных минералов и разработке методов контроля цементного камня и бетонных конструкций.[37] На этой основе представлены эффективные технологии повышения стойкости бетонных и железобетонных конструкций к коррозионным разрушениям.

Одним из основных направлений прогресса в технологии бетона является его совершенствование за счет использования химических добавок, подтвержденных теоретическими исследованиями и внедренных в промышленное производство. В настоящее время известны комплексные модификаторы, сочетающие в себе несколько функциональных свойств, таких как:

В сегменте высокоэффективных преобразователей текучести особое место занимают такие составы, как С-3 и МФ-АР, способные кардинально изменить поведение бетонной смеси. Для регулирования начальной скорости схватывания в технологическую систему добавляются ингибиторы на основе НТФ, снижающие скорость процессов гидратации. При формировании определенной воздушной структуры в смеси на помощь приходят аэрационные реагенты — к ним относятся ГКЖ-10, ГКЖ-11, а также малоинерционные компоненты типа НЧК и КЧНР. В случаях, когда необходимо инициировать вспенивание изнутри, предпочтение отдается аэрированным активам, таким как КЭ 30-04, ПГЕН и ПГН. Что касается вопроса снижения водопроницаемости, то здесь акцент делается на открытые гидрофобно-ориентированные композиты, которые считаются одинаково эффективными между ФЭС-50 и Penetron.

Эффективное использование композиционных модифицированных смесей оказывает целенаправленное влияние на свойства бетонов и растворов. Это объясняется тем, что органические соединения влияют на структуру адсорбционных слоев цементных частиц и наполнителей, способствуя улучшению текучести, снижению водопотребности и стабилизации состава.

Промышленное производство суперпластификаторов как товарной продукции началось в Европе в конце 1950-х годов, а их активное внедрение в Казахстане началось в конце 1970-х годов.

Среди важных достижений в области бетоноведения выделяется разработка суперпластификаторов (СП) и микрокремнезема (МК), которые позволили добиться значительных успехов в производстве более прочных и эффективных материалов. Расширение номенклатуры искусственных смесей, содержащих высокодисперсный кремнезем, дало толчок развитию систем химической модификации минералов.

Композиционный модификатор, сочетающий в себе органические и минеральные компоненты, позволяет эффективно регулировать реологические свойства смеси и одновременно способствовать формированию более упорядоченной микроструктуры цементного камня. Это позволяет производить бетон с высокой удобоукладываемостью и стабильными эксплуатационными свойствами [38–40].

Использование смесей с уникальными физико-химическими свойствами на разных структурных уровнях привело к формированию нового класса материалов: высокопрочных бетонов. Классификация бетонных материалов по уровню прочности предполагает следующее различие: в диапазоне от 60 до 80 МПа материал относится к категории высокопрочных, значения, превышающие предел в 100 МПа, позволяют отнести состав к высокопрочным бетонам. Обладает низкой электропроводностью, высокой коррозионной стойкостью и длительным сроком службы. Современный высокопрочный бетон, известный как высокоэффективный бетон (ВБ), не только сочетает в себе высокую прочность и технические характеристики, но также является экологически чистым и экономичным за счет низкой энергоемкости и широкого использования местных и искусственных материалов [41–43].

Классификация высокопрочных бетонов основана на их эксплуатационных характеристиках. Таким образом, бетоны, характеризующиеся сбалансированными показателями прочности и плотности, относятся к категории высокопрочных (High Performance Concrete). Если механическая прочность достигает предельных значений, смесь относится к группе сверхвысокопрочного бетона (СВБ) [44]. Отдельную категорию составляют композиты SCC (самоуплотняющийся бетон), которые обладают способностью к самоуплотнению без воздействия внешних вибраций [45]. Кроме того, существует сегмент материалов, устойчивых к особо агрессивным средам, рецептура которых разработана с учетом коррозионной активности. Последнюю нишу занимают горные породы (реактивные порошковые бетоны) – разновидности, проходящие многоуровневую селекцию по дисперсному составу и степени зернистости, направленную на создание плотной и однородной структуры [46,47].

Во второй половине XX века, особенно в 1970-е годы, при производстве высокопрочного бетона были зафиксированы многочисленные случаи образования микротрещин. Основной причиной возникновения таких дефектов является недостаточное уплотнение твердых добавок, используемых для получения прочности в диапазоне М600–М700. Эти составы изготавливаются

на основе высококачественных цементов и характеризуются очень низким водоцементным отношением. Для обеспечения необходимой плотности использовались методы интенсивного виброуплотнения, включающие повторные циклы и использование дополнительного заполнителя.

В начале 1980-х годов произошел значительный технологический прорыв с появлением суперпластификаторов на основе сульфонатов меламина и нафталина. Их применение позволило массово производить бетон прочностью до 100 МПа. В конце века благодаря разработке модифицированных полимерных добавок — поликарбоксилатных, полиакрилатных и полиэтиленгликолевых структур (ПЦС) — был достигнут новый уровень: началось производство бетонов, прочность которых достигала 150-200 МПа [48,49].

Механизм действия суперпластификаторов и поликарбоксилатных полиолов (МСО) основан на адсорбции их молекул на поверхности частиц цемента и продуктах гидратации клинкерных минералов. Это изменяет ионный электростатический потенциал, что приводит к отталкиванию между частицами. В условиях МСО боковые цепи дополнительно реализуют значительный стерический эффект, способствуя сильному диспергированию и тем самым улучшая реологические свойства бетонной смеси.

Важно отметить, что водоотталкивающий эффект суперпластификаторов и МСО проявляется только в водно-диспергируемой цементной фазе. Поэтому с уменьшением количества цемента в смеси уменьшается и количество активной диспергирующей среды, что ослабляет водоредуцирующий эффект. Многочисленные исследования подтвердили, что высокие уровни гидрирования могут быть достигнуты за счет увеличения количества дисперсных компонентов (смесей цементов и минералов с высокой удельной поверхностью).

Количество цемента в смеси оказывает прямое влияние на эффективность действия суперпластификаторов. При дозировке цемента 400–600 кг/м³ водоредуцирующий эффект достигает 20–35 %, при 250–300 кг/м³ — 10–15 %, а при содержании 150–200 кг/м³ — снижается до 5–7 % [50].

Поэтому для повышения эффективности применения суперпластификаторов и МСО в растворителях и бетонных смесях рекомендуется вводить в систему тонкодисперсные минеральные модификаторы с удельной поверхностью не менее 4500 см^2/г, что позволит улучшить диспергирующий эффект и стабилизировать структуру цементной массы [51,52].

Производство высокопрочного и качественного бетона является одной из основных задач современного строительного комплекса, поскольку его использование открывает широкие возможности для реализации уникальных архитектурных решений и возведения долговечных конструкций. Основным препятствием, препятствующим активному распространению бетонов нового поколения, отличающихся повышенной стойкостью и долговечностью к

агрессивным факторам, остается недостаточная разработанность технологий их массового производства в строительной практике Казахстана. Немаловажную роль играет и отсутствие полноценной нормативной и проектной базы, необходимой для правильного проектирования несущих элементов из таких материалов. В рамках существующих ограничений применение данных бетонов особенно оправдано при изготовлении архитектурно-художественных и декоративных элементов, а также при создании долговечных инженерных конструкций, эксплуатирующихся в сложных условиях. Это направление позволит в полной мере раскрыть технологические преимущества модифицированного бетона нового поколения.

Постоянное расширение ассортимента разжижающих добавок вызвало необходимость их систематизации по нескольким основным признакам, в первую очередь по химической природе действующего вещества. На основе сравнительного анализа пластифицирующих добавок, используемых в технологии высокоподвижных бетонов, систематизирован комплекс основных видов современных суперпластификаторов (таблица 1.1). Каждый из них характеризуется уникальным механизмом воздействия на структуру вязкой системы и отличается по происхождению и молекулярной структуре.

К первой категории относятся вещества на основе меламиноформальдегидной смолы с высоким уровнем сульфатирования. К ним относятся добавки, широко представленные на международных рынках: Melment (Германия), Conplast (Англия), friodur (Швеция), а также отечественные разработки — 10-03, MF-AR и другие.

Следующий блок состоит из производных нафталинсульфоната, полученных реакцией с формальдегидом. В эту подгруппу входят Maite (Япония), Rheobuild (Германия), а также Lomar D, Cormix, Fluimax и отечественная казахстанская продукция на их основе.

Третий цикл включает модифицированные лигносульфонаты, представляющие собой переработанные природные полимеры. Среди них можно отметить pozzolith 90, Chris fluid, а также адаптированные региональные версии — khdsk, LSTM и другие.

Так, наиболее технологически прогрессивные решения связаны с внедрением полиакрилатных и поликарбоксилатных систем нового поколения, в том числе продукции Viscocrete, GLENIUM и Sika, а также линейки акриловых сополимеров с высокорастворимыми и специфическими гидрофильными фрагментами.

С развитием химии полимеров была разработана обширная линейка модифицированных PCE-продуктов, включающих производные аллилового эфира (APEG), металлилового эфира (HPEG) и изопренилового эфира (IPEG). Эти соединения обеспечивают расширенные возможности адаптации свойств суперпластификатора под конкретные технологические требования.

В зависимости от функционального назначения поликарбоксилатные суперпластификаторы условно делятся на две категории: стандартные,

обеспечивающие базовые водоредуцирующие и пластифицирующие свойства, и специализированные, предназначенные для управления специфическими технологическими параметрами бетонной смеси (например, замедление схватывания, ускорение набора прочности, повышение удерживающей способности и т. д.).

Сложноорганизованные молекулы поликарбоксилатных пластификаторов образованы за счет полиметакрилатного скелета, в котором равномерно распределены ионогенные карбоксильные группы. Они обеспечивают прочную фиксацию на границах цементных зерен. Параллельные основной цепи боковые фрагменты — связи полиэтиленоксида или полиэтиленгликоля — создают объемный барьер, который не взаимодействует с поверхностью минерала, но препятствует слипанию частиц за счет защиты внешнего пространства.

Главным преимуществом таких молекулярных структур является возможность конструирования макромолекул для конкретных технологических условий. Путем целенаправленного изменения архитектуры — длины, плотности распределения и химической природы боковых фрагментов — достигается совместимость модификатора с конкретным минеральным фоном. Это важно при приготовлении бетонных композиций с высокой чувствительностью к составу вяжущих и добавок, в том числе систем с различными видами цемента и пуццолановыми добавками.

Таблица 1.1 - Характеристика пластифицирующих-водоредуцирующих добавок

Год внедрения	Класс	Химическое основание	Уровень снижения воды, %	Примеры продуктов
1960	I	Формальдегидные смолы с сульфомеламином (MSF)	15–30	НИЛ-10, 10-03, Melment, Conplast, Zikament-FF
1972	II	Конденсаты нафталинсульфонатов с формальдегидом (NSF)	15–25	С-3, Mighty, Cormix, Chrisfluid
1979	III	Лигносульфонаты с модификацией (LS)	5–15	ЛСТМ, ХДСК-1, Plastiment BV40
1990	IV	Производные полиакрилатов и поликарбоксилатов	20–30	Mighty (Япония)
1993	IV	Поликарбоксилатные сополимеры (PA)	20–30	Melflux 1641, Sika ViscoCrete-20 HE
1997		Поликарбоксилановые эфиры (PCE)	25–40	Glenium 115, Glenium 430
1997		Акриловые сополимеры (CAE)	25–40	Melflux 5581 F

Конечная эффективность суперпластификаторов в цементных композициях формируется в результате сложного взаимодействия многих факторов, среди которых преобладают параметры макромолекулярной структуры, реакционная способность групп, входящих в структуру, а также геометрическое расположение цепей, определяемое степенью полимеризации и молекулярной массой. К таким веществам, действующим в качестве поверхностно-активных веществ, относятся как органические вещества природного происхождения, так и полностью синтезированные соединения. В зависимости от длины полимерной цепи их принято классифицировать как короткие сегментированные структуры или макромолекулы с развитой конфигурацией цепи.

Высокомолекулярные ПАВ с разветвлённой структурой и высоким числом гидрофильных групп демонстрируют выраженный разжижающий эффект, благодаря способности эффективно адсорбироваться на поверхности цементных частиц. Это вызывает появление поверхностного заряда, снижение межчастичных сил взаимодействия и, как следствие, повышение текучести цементно-водной дисперсии.

Одним из основных факторов, определяющих эффективность суперпластификатора, является характер его адсорбции на минеральных компонентах. Прочность и механизм связывания молекул поверхностно-активных веществ с цементной матрицей напрямую влияют на технологические свойства и долговременную стабильность модифицированных смесей. Оптимизируя молекулярную структуру суперпластификатора, можно точно контролировать реологические свойства бетонной смеси для достижения требуемых характеристик при минимальном расходе воды [54,55].

Предел дисперсии может быть достигнут, когда переход между водорастворимыми и водонепроницаемыми сегментами различной химической природы в полимерной цепи четко определен. Структурно-молекулярный анализ основных представителей суперпластификаторов позволил выявить: как устроены и сочетаются эти гидрофильные и гидрофобные связи, в какой степени они препятствуют процессам коллоидизации и гидратации в высоковязких цементных системах.

Гидрофильно-липофильный баланс (ГЛБ) характеризует склонность молекулы к диспергированию в водной среде и выражается числовыми значениями в диапазоне от 1 до 40. Смеси ГЛБ 1-4 обладают значительной гидрофобностью и не растекаются в воде, тогда как материалы ГЛБ 9-12 демонстрируют отличную гидрофильность и высокую диспергируемость. При значениях выше 13 наблюдается водорастворимое поведение. Структурный анализ суперпластификаторов с гидрофобными углеводородными кольцами и активными гидрофильными группами показывает, что увеличение доли гидрофильных фрагментов и последовательное уменьшение количества гидрофобных компонентов улучшает пластифицирующий эффект. Это

достигается за счет увеличения дисперсности частиц цемента, улучшения текучести бетонной смеси и повышения водоотталкивающих свойств смеси.

Например, основная структурная единица суперпластификатора СП 40-03, полученного конденсацией сульфокислоты с формальдегидом, содержит две анионные сульфоактивные группы, проявляющие высокую адсорбционную активность [56]. Необходимость создания суперпластификатора с определенной молекулярной конфигурацией определяет выбор технологического метода его синтеза. Наиболее распространенная стратегия — полимеризация желаемого мономера и последующее его сульфирование.

Механизм действия различных типов пластификаторов и суперпластификаторов был подробно проанализирован в нескольких научных исследованиях [57], и были представлены теоретические модели, объясняющие, как эти соединения влияют на процессы структурообразования и гидратации в цементных системах.

Одна из гипотез заключается в том, что пластифицирующий эффект связан с образованием микропузырьков воздуха, которые действуют как псевдожидкая смазка при введении добавки. Другая теория утверждает, что снижение поверхностного натяжения воды улучшает смачивание частиц цемента, способствуя более эффективному диспергированию. Топохимическая модель объясняет действие коллоидных слоев кальция, которые образуются на поверхности частиц, уменьшая трение и регулируя поток жидкости. Кроме того, наличие привитых боковых цепей реализует механизм стерического отталкивания в диффузионном слое, который играет важную роль в суперпластификаторах группы IV (см. Таблицу 1.1), особенно в поликарбоксилатах (ПКЭ), где этот эффект важен.

Пластифицирующий эффект и его влияние на кинетику гидратации зависят от структуры органоминеральной адсорбционной пленки, образующейся на поверхности частиц цемента. Состав полимеров в этой пленке и характер их распределения определяют ее эффективность.

Основные клинкерные минералы в портландцементе, трикальцийсиликат (CSS) и два силиката кальция (C_2S), имеют отрицательный дзета-потенциал в водной среде, тогда как триалюминат кальция (CAA) и тетраалюминат кальция (CAFAF) характеризуются положительным зарядом. Введение суперпластификаторов повышает поверхностную активность этих фаз, усиливая электростатическое отталкивание между частицами, предотвращая агломерацию и обеспечивая равномерное диспергирование в водной фазе.

Применение поверхностно-активных веществ расширяет область действия электростатических сил: если для чистой воды зона действия составляет около 10 нм, то при наличии ПАВ она увеличивается до 100 нм. В точке контакта силы отталкивания достигают величин порядка $(0{,}16–0{,}44)\times10^{-9}$ Н, что существенно повышает стабильность цементной суспензии, её дисперсность и сохраняет требуемый реологический режим.

Например, экспериментально установленные зависимости свидетельствуют о том, что лигносульфонаты, а также производные нафталин- и меламинсульфокислоты универсальны по адсорбции – они полностью взаимодействуют с цементными минералами, не целенаправленно взаимодействуя с какой-либо определенной фазой. Напротив, суперпластификаторы на основе поликарбоксилатной структуры проявляют выраженную селективность: они оседают преимущественно на зернах крафа и кофефа и вступают в контакт с продуктами гидратации. Учитывая, что Кранта обладает наибольшей химической активностью в первый момент после связывания, можно предположить, что направленная адсорбция на его поверхности повышает эффективность модификатора. Эту гипотезу подтверждают и данные по дозировке: поликарбоксилаты обеспечивают необходимое водоснижение при значительно меньших концентрациях по сравнению с SNF и SMF. Это в свою очередь указывает на ограниченное участие ПХЭ в реакциях CDUS и Кранса и их минимальную вовлеченность в процессы гидратации.

При изменении молекулярной массы и конфигурации сополимеров образуются боковые ответвления, способные образовывать плотный пространственный барьер вокруг зерен цемента и фаз гидратации. Эта разветвленная молекулярная решетка существенно ограничивает сближение частиц и создает прочные исторические барьеры. В результате усиливаются междоузлийные электростатические отталкивания, что кардинально меняет режущие свойства материала — смесь демонстрирует значительно улучшенные текучие свойства. В таких условиях именно трехмерная геометрия боковых цепей начинает доминировать в контроле этой реологической реакции, отодвигая другие механизмы на второй план.

Несколько научных исследований [58] показали, что даже низкомолекулярные пластификаторы могут оказывать значительные стерические эффекты. Для высокомолекулярных соединений, таких как лигносульфонаты и меламинформальдегидные суперпластификаторы, доля стерического отталкивания в общей взаимодействующей системе может достигать 50%.

Эффективная интеграция суперпластификатора в систему на основе портландцемента невозможна без тщательного учета ряда ключевых химических и физических факторов. Прежде всего, на поведение смеси влияет не только состав высокомолекулярных цепей и функциональных сульфогрупп, но и динамика растворимости гипсовых фаз, а также величина щелочной активности среды. Эти свойства играют решающую роль на начальном этапе взаимодействия полимерных компонентов с цементной матрицей, определяя, насколько быстро и полно происходит адсорбция и как формируется начальная пространственная структура материала. Игнорирование этих параметров приведет к снижению эффективности модификации и может вызвать нежелательные побочные эффекты в реологическом поведении смеси.

Несовместимость компонентов, вероятно, обусловлена образованием на поверхности алюминиевой фазы на ранних стадиях гидратации плотного слоя гидратированной опухоли, толщина которого сопоставима с размерами дисперсных частиц.

В зависимости от скорости роста кристаллов эттрингита и адсорбционных свойств суперпластификатора возможны два сценария:

- если толщина адсорбционного слоя больше высоты гидратационного желоба, смесь сохранит высокую эффективность.

Когда толщина слоя гидратной фазы превышает толщину адсорбированного слоя, действие пластификатора ослабевает или прекращается.

Это приводит к временному снижению эффективности, за которым следует постепенная потеря эффекта разбавления в течение 2–3 часов после смешивания.

Для суперпластификаторов, относящихся к первым трем группам (см. табл. 1.1), наиболее подходящим объяснением является теория адсорбции. Таким образом, полярные молекулы пластификатора вытесняют воду из слабоадсорбированного слоя на поверхности частиц цемента, что приводит к снижению электрокинетического потенциала (π-потенциала) и, как следствие, ограничивает диспергируемость системы.

Усиление электростатических взаимодействий между частицами в цементных системах приводит к сегрегации цементных агрегатов, снижению критического напряжения перед проникновением и снижению эффективной вязкости цементно-водных суспензий, что приводит к значительному снижению внутреннего трения. Эти процессы способствуют повышению подвижности частиц, улучшению текучести смеси и улучшению общих реологических свойств.

Сильное ослабление внутренних связей между частицами в смеси обусловлено комплексным действием пространственных (стерических) затруднений и зарядового (электростатического) отталкивания, что приводит к резкому увеличению их подвижности. Этот двойной эффект приводит к нарушению нормальной структуры системы за счет снижения сопротивления потоку. В рамках этих изменений изменяется и динамика плавления компонентов клинкера: присутствие поверхностно-активных веществ ускоряет или замедляет этот процесс, что влияет на пересыщение жидкой среды и, как следствие, на перераспределение жидкости к поверхности минеральных тел, изменяя характер капиллярных сил в системе [59].

Добавление воздуха в структуру смеси — явление, сопровождающееся ростом производительности. Однако наличие такой воздушной фазы снижает механическую прочность материала, ухудшает его влагостойкость и разрушает микроструктуру цементного тела. Основные этапы действия суперпластификаторов в системе можно свести к следующим явлениям:

- присоединение полимерных молекул к поверхности твердых соединений сопровождается разрушением межчастичных связей;

- увеличение и уменьшение электрокинетического потенциала при адсорбции на заряженных поверхностях;

- нарушение конфигурации двойного электрического слоя, вызванное взаимодействием растворенных минеральных ионов и ориентированных диполей воды.

- благодаря адсорбционным взаимодействиям регулирует толщину пограничного слоя воды вблизи поверхности частицы.

Эффективность этих процессов зависит от структуры молекулы суперпластификатора, в первую очередь от количества и конфигурации активных групп.

Таким образом, при адсорбции молекул нафталинсульфоновой кислоты (НСФ) на частицах цемента поверхностный потенциал уменьшается от -10 МВ до -(20-35) МВ. Поверхность приобретает значительный отрицательный заряд, способствующий возникновению определенного электростатического отталкивания между частицами, что приводит к диспергированию и пластификации. В таких случаях суперпластификатор выполняет функцию стабилизатора дисперсионной системы.

Когда молекулы поверхностно-активного вещества покрывают поверхность зерен цемента, они образуют слой, который действует как изолирующий барьер и резко ослабляет прочность сцепления между частицами. В этом случае энергия, необходимая для начала взаимодействия с водой, уменьшается, а дрейф между частицами увеличивается как минимум в два раза по сравнению с толщиной отдельной молекулы. При этом толщина образующегося полимерного слоя может достигать 15 нанометров, что является критическим для начала его структурообразования.

Если такие составы вводить в смесь на более поздней стадии гидратации, то их действие приведет к разрушению ранее скрепленных цементных швов в результате реакции с водой. Это инициирует процесс перераспределения и измельчения мелких и средних частиц, покрытых полусмоченными мембранами. При этом ранее закрытая капиллярная влага сжимается, что резко увеличивает текучесть системы и способствует активному перераспределению компонентов вязкой фазы.

Резкое увеличение доли взвешенных частиц цемента в системе приводит к быстрому расширению площади активных поверхностей, где происходит смачивание. Этот скачок реакционной активности приводит к началу лавинообразных фазовых превращений клинкерных минералов. Однако при высокой насыщенности среды зародышами новых фаз процессы их формирования начинают сталкиваться с пространственными ограничениями — возникающее структурное давление препятствует равномерному росту и приводит к фрагментарному развитию гидратных структур. В результате вместо однородной матрицы формируется слабоупорядоченная сетка, в которой

преобладают неоднородные агломераты. Это явление связано с молекулярной селективностью и проявляется в снижении степени пространственного ограничения. Последовательность структурообразования можно выразить следующим образом: кластеры частиц гидратированной фазы → наночастицы → неупорядоченные агрегаты → частично упорядоченные агрегаты → хлопьевидные агрегаты → отдельные монолитные агрегаты.

Степень электролиза при стандартных дозах суперпластификаторов на основе нафталинформальдегидных (СНФ) и меламинформальдегидных (СМФ) соединений может варьироваться в широких пределах от 30 до 70% в водных средах. Прочные адсорбционные связи этих смесей с минеральными компонентами цемента обеспечивают закрепление молекул на поверхности гидратированной фазы и способствуют образованию дисперсных структур с удельной поверхностью, превышающей исходную поверхность частиц портландцемента.

В идеале суперпластификатор следует добавлять в бетономешалку за 10–15 секунд до окончания смешивания, чтобы получить максимальный эффект разбавления и водоснижения[61].

Внутренняя структура полимерной цепи суперпластификатора оказывает решающее влияние на свойства создаваемого им адсорбционного экрана — его плотность, проницаемость и устойчивость во влажной среде. Когда гидрофильные радикалы сульфоновой кислоты взаимодействуют с реакционноспособными участками на поверхности частиц цемента или продуктов их гидратации, они не просто прилипают к ним — вокруг этих участков образуется устойчивая гидратная оболочка, изолирующая частицы от прямого контакта. Но если в структуре суперпластификатора преобладают неполярные фрагменты, непроницаемые для воды, то он начинает играть противоположную роль: вместо активной гидратации и проникновения воды к поверхности цемента образуется барьерная пленка. Эта молекулярная защита, состоящая в основном из гидрофобных доменов, блокирует капиллярный доступ жидкости, замедляет проникновение воды в глубь структуры и, как следствие, блокирует начальные стадии гидратации и уплотнения цементной матрицы.

При использовании в составе цементных композиций (включая цементные пасты, растворы и бетонные смеси) высокоэффективных суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов (группа IV, только ПЦЭ) необходимо строго соблюдать технические регламенты. Поликарбоксилатные полиэфиры играют агрессивную роль в изменении поведения цементных композитов, выступая как поверхностно-активные вещества и как элементы формирования внутренней структуры смеси. Эти составы не просто повышают текучесть — они радикально изменяют микромеханику гидратации, нарушают привычные связи и перегружают систему заданными параметрами. Их применение особенно актуально при изготовлении прочностных и самоуплотняющихся соединений, где необходимо добиться максимального

соотношения между водоудерживающей способностью, скоростью твердения и пределом прочности. По сути, такие полиэфиры демонстрируют классическую кинетику реакции, которая диктует новую, упорядоченную архитектуру, устойчивую к разрушению при чрезмерных нагрузках в процессе эксплуатации в цементном камне.

Химическая модификация карбоксилсодержащих полимеров позволяет вводить в структуру полимера длинные боковые цепи олигоалкиленоксидов с образованием эфирных или амидных связей. 1.5). Такая структура позволяет производить водорастворимые полимеры типа Carboceps с эффективными высокоэффективными пластификаторными свойствами.

Молекулярная архитектура современных разветвленных поликарбоксилатных суперпластификаторов позволяет точно настраивать их воздействие на коллоидную химию, включая процесс гидратации клинкерных минералов, и структуру цементных систем — от паст до бетонных смесей. Эти свойства контролируются выбором длины основной и боковой цепей, плотности разветвлений, уровня заряженных ионов и объемных параметров молекулы.

В зависимости от деталей их пространственной организации эти полимеры классифицируются как «гребнеобразные» (на английском: comb-shaped). В качестве мономерной основы для синтеза этих суперпластификаторов часто используют акрилаты и метилметакрилат, обладающие высокой реакционной способностью и структурной пластичностью. Эти мономеры позволяют модифицировать функциональные группы и оптимизировать молекулярную структуру в зависимости от желаемых технических и эксплуатационных свойств бетонной смеси.

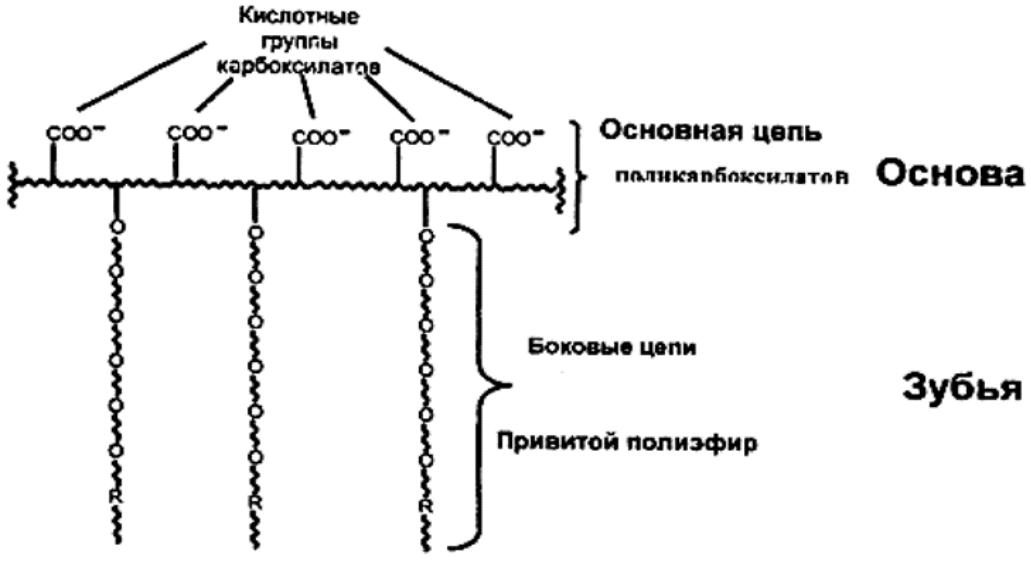


Рис. 1.6 – Схематическое представление архитектуры молекулярной структуры суперпластификаторов поликарбоксилатного типа

Основной путь влияния поликарбоксилатныхсуперпластификаторов на поведение цементной системы связан с формированием пространственного отталкивающего барьера, возникающего за счёт длинных боковых цепей, отходящих от адсорбированных на зернах макромолекул (см. рис. 1.6). Эти цепи, в зависимости от их протяжённости, могут проникать за границы диффузного слоя, изменяя геометрию взаимодействия частиц. На фоне этого развиваются процессы дезагрегации, сходные по своей природе с теми, что наблюдаются при использовании добавок на основе сульфонатных полимеров, однако здесь ключевую роль играет уже не столько электростатическое отталкивание, сколько стерический эффект, в ряде случаев дополнительно усиливаемый локальными изменениями ξ-потенциала.

Повышенный эффект пластификации связан с трехмерным эффектом, который увеличивает общую упругость цементной системы (растворных и бетонных смесей). В этом случае вязкость системы уменьшается, а привитые боковые цепи образуют энергетический барьер в диффузионном слое, предотвращая агрегацию частиц и обеспечивая сохранение реологических свойств с течением времени [63].

Современные поликарбоксилатные суперпластификаторы имеют несколько типов привитых боковых цепей. Его действие проявляется в течение строго ограниченного периода времени, оказывая наибольший эффект в период сохранения подвижности бетонной смеси, а также влияя на различные стадии смачивания и формирования цементного камня.

Диспергирующий эффект, характерный для поликарбоксилатных эфиров, объясняется их активным прилипанием к положительно заряженным областям цементных частиц — особенно тем, где преобладают алюминатные и ферритные фазы (C_3A, C_4AF), а также к зарождающимся соединениям гидратации, включая эттрингит и моносульфоалюминат [64]. Благодаря такому выборочному взаимодействию с минеральными составляющими, эффективная доза PCE удерживается в нижнем диапазоне — от 0,15 до 0,6% по объёму концентрированных промышленных растворов. Для сравнения, суперпластификаторы предыдущих поколений (НСФ, СФ) требуют дозировок от 0,3 до 1,2% в расчёте на сухую массу. Такая разница обусловлена также наличием в молекуле PCE кислотных групп (CO^-), которые прочно координируются с кальциевыми ионами (Ca^{2+}), вовлекая их в состав первичных гидратных структур. Это резко ускоряет дезагрегацию цементного порошка, одновременно ограничивая агломерацию и формируя устойчивый к осаждению дисперсный каркас.

Поликарбоксилаты обладают выраженным эффектом дыхания благодаря высокой поверхностной энергии на границе раздела жидкость/газ. В то же время при внедрении в промышленный цикл составов, содержащих поликарбоксилаты, необходимо ограничивать спонтанное присутствие воздуха ввиду его высокой межфазной активности. Для подавления этого эффекта в технологический процесс целенаправленно вводят пенообразователи,

препятствующие избыточному пенообразованию. Эту поправку очень важно учитывать при работе с пористыми матрицами, где регулируемое дыхание напрямую влияет на устойчивость материала к циклическому замораживанию и оттаиванию, т. е. на уровень морозостойкости [66].

Высокий уровень структурной активности поликарбоксилатных эфиров (ПЭ) дополняется их способностью обеспечивать эффективное системное регулирование, однако наличие в нем добавок, таких как лигносульфонаты, существенно влияет на микроморфологию цементного камня, в частности, способствуя образованию замкнутых микропространств. При этом максимальная концентрация этих компонентов должна строго регламентироваться: допустимый уровень лигносульфонатов не должен превышать 0,1% от массы цементного вяжущего, что в среднем на 0,15-0,25% ниже общепринятых технологических значений.

При выборе рецептуры бетонной смеси целесообразно увеличить долю песка по отношению к массе заполнителя путем введения поликарбоксилатных суперпластификаторов. При этом фракционный состав песчаной составляющей должен соответствовать строгим критериям: особое внимание уделяется гранулометрическому составу, который напрямую влияет на совместимость смеси с суперпластификатором и обеспечивает требуемую текучесть и плотность упаковки. Воздух в бетоне в основном содержится в растворе, а его количество зависит от фракционного состава песка. Наиболее подходящий размер частиц составляет 0,2...1 мм. Наличие в песке частиц размером менее 0,2 мм снижает количество всасываемого воздуха. На практике часто используют кварцевый песок, так как он обладает отличной воздухопроницаемостью.

Качество наполнителя следует также оценивать по содержанию в нем реактивного диоксида кремния. Это связано с тем, что использование больших количеств цемента и поликарбоксилатных суперпластификаторов может привести к тому, что общая концентрация щелочей в бетонной смеси превысит критический уровень (3 кг на $м^3$ бетона). В этом случае существует риск возникновения щелочной реакции между гидратированным цементным камнем и кремнеземом в заполнителе, что приведет к образованию геля с высокой способностью к расширению. Подобные процессы могут привести к разрушению бетонных и железобетонных конструкций даже через 10–15 лет эксплуатации.

Применение поликарбоксилатных суперпластификаторов оказывает существенное влияние на технологические свойства бетона и конечные эксплуатационные характеристики материала, обеспечивая его высокое качество. Более того, эффективность пластификаторов типа МСО значительно превосходит эффективность других типов пластификаторов за счет их способности производить высокопрочный и более прочный бетон.

1.3.2 Применение полимеров в бетонах

В условиях повышения требований к физико-механическим свойствам современных бетонных и железобетонных конструкций строительная отрасль все чаще обращается к использованию полимерных компонентов, способных кардинально изменить свойства цементных композитов. Эти соединения используются не только как модификаторы в растворах и смесях, но и как активные пропиточные составы, создающие защитные барьеры в порах и капиллярах готовых изделий. С технологической точки зрения использование полимеров не нарушает классическую схему производства бетона, основанную на совместной работе минерального вяжущего и органической полимерной фаз. При взаимодействии с водой образуется основной цементный камень, связывающий зернистые фракции, а полимерная составляющая проникает в микроструктуру и образует тонкопленочный барьер, регулирующий испарение влаги из материала [67].

Композиты на основе цемента и полимеров демонстрируют совершенно разный уровень эксплуатационных характеристик. Повышенная прочность на изгиб и растяжение, повышенная морозостойкость, улучшенная адгезия и абразивность, резкое снижение водопроницаемости выводят этот класс материалов за рамки традиционного представления о бетоне. Однако в некоторых случаях такие системы подвержены существенным проявлениям хрупкости при длительном воздействии влажной среды или под водой, что ограничивает их применение без предварительной адаптации.

Среди полимеров, используемых в цементных системах, наиболее распространены ПВА, латекс и водорастворимые смолы, а наиболее эффективными считаются эпоксидные материалы. Их реакционная активность требует точного соблюдения условий отверждения и присутствия катализаторов, но полученные композиты обладают исключительными прочностными свойствами и используются в различных конструкционных и ремонтных решениях [68].

В рамках современных исследований особое внимание уделяется синтетическому полимеру поливинилпирролидону, который может оказывать минимально значимое влияние на пластичность и реологические свойства цементных смесей. С момента патентования Вальтером Реппе в 1939 году этот материал стал ключевым компонентом высокотехнологичных связующих систем, определяя динамику формирования и гидратации на молекулярном уровне.

Первоначально его использовали в качестве заменителя плазмы, но постепенно его применение распространилось на фармацевтическую, косметическую и промышленную отрасли, а также даже на пищевую промышленность в качестве пищевой добавки (E1201).

Поливинилпирролидон — синтетический полимер, признанный безопасным для человека и одобренный для использования в различных

отраслях промышленности во многих странах мира. Внешне это белое или слегка желтоватое порошкообразное вещество с выраженными гигроскопичными свойствами. Он обладает способностью поглощать до 40% окружающей влаги, что положительно влияет на процесс гидратации клинкерных минералов в затвердевшей структуре цементного камня. Поливинилпирролидон смешивается с водными растворами, спиртами, хлороформом и другими полярными растворителями, но не смешивается с эфирами.

Основные характеристики:

- Молекулярная формула: C_6H_9NO
- Молярная масса: от 2 500 до 2 500 000 г/моль
- Плотность: 1,2 г/см³
- Температура плавления: 150–180 °C
- Выраженные клеящие свойства

Поливинилпирролидон (ПВП) — синтетический полимер, гамма-виниллактам N-аминомасляной кислоты. В зависимости от параметров синтеза можно получать полимеры винилпирролидона различной молекулярной массы. Благодаря высокой адсорбционной и собирающей способности ПВП используется в качестве эффективного клея, особенно в составах полистиролбетона.

С точки зрения технологической адаптации наиболее оптимальной формой поставки поливинилпирролидона является водная суспензия с массовой долей действующего вещества на уровне 10-15%. Продукт, известный как Повидон К30 (EHU International Co., LLC., Китай), зарекомендовал себя как стандартная модификация для практического использования. Согласно данным производителя, рекомендуемые объемы варьируются в зависимости от плотности цементной системы: для легких смесей (300-400 кг/м3) целесообразно использовать дозировку 0,1% от массы цементного компонента; При увеличении плотности до 900-1200 кг/м3 доля повидона-К30 увеличивается до 0,2%.

Представление структурных свойств поливинилпирролидона позволяет получить диаграмму молекулярной конфигурации, представленную на рисунке 1.7, которая показывает внутреннюю организацию цепей и рабочих радикалов.

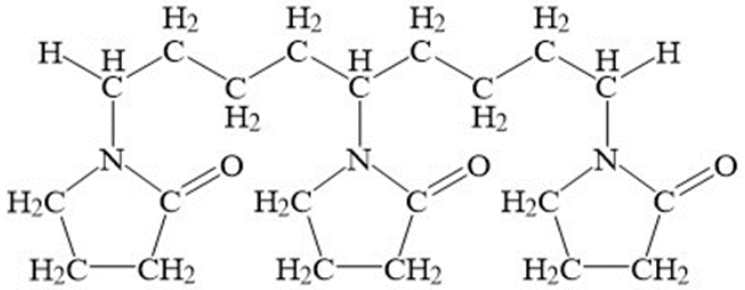


Рис.1.7 – Схематическое изображение молекулярной структуры Повидона К30

Исследование показывает, что способность поливинилпирролидона образовывать прочные межфазные связи и влиять на текучесть цементных композиций делает его перспективным кандидатом для использования в производстве бетона, эксплуатируемого в агрессивных условиях окружающей среды. Обоснование актуальности подобных исследований особенно актуально в условиях Республики Казахстан, где подобная тема еще не получила системной научной разработки.

1.3.3 Предпосылки использования отходов ферросплавной промышленности для улучшения гидрофизических характеристик литых модифицированных бетонов

Предпочтение отдается подходу, основанному на использовании высокоактивных минеральных компонентов и обеспечении очень плотного внутреннего покрытия цементно-каменной матрицы для сопротивления выщелачивающей коррозии, вызванной потерей гидроксида кальция — основного чувствительного звена в структуре цементного вяжущего. Эмпирические данные [70,71] показывают, что структурная деградация с потерей 20–30% компонента гидроксида кальция приводит к резкому снижению прочности, которое в некоторых случаях может превышать 50%.

Авторы многих работ сходятся во мнении, что минеральные компоненты, содержащие кремний, в частности диоксид кремния в форме микрокремнезема, эффективны в задаче стабилизации структуры. Этот побочный продукт, выделяющийся при плавке ферросилиция, состоит более чем на 91% из аморфного SiO. Частицы размером от 10 до 50 микрон улавливаются электростатической фильтрацией в процессе улавливания промышленных выбросов [72].

Начало промышленного применения микрокремнезема было обусловлено несколькими факторами, среди которых стремление реализовать принципы безотходного производства, необходимость снижения воздействия на окружающую среду и экономичность потребления цементного вяжущего. Первые исследования в этой области за рубежом относятся к 1950-м годам[73], а практические испытания в странах СНГ начались в 1980-х годах[74].

Благодаря тонкому помолу и высокой удельной поверхности кремнезем проявляет выраженные пуццолановые свойства. Это способствует формированию плотной микроструктуры цементного камня и повышению его эксплуатационных свойств.

Согласно результатам исследований [75,76], основными преимуществами использования микрокремнезема являются:

- Увеличивает адгезию и площадь контакта между заполнителем и цементной матрицей.

- Выполняет функцию микроэлемента, заполняя поровое пространство и снижая проницаемость.

- Он вступает в химическую реакцию с Ca(OH)2 с образованием низких фаз CSH, что повышает механическую прочность и ударную вязкость бетона.

Добавление микрокремнезема в пределах 1-5% от общего объема вяжущего компонента вызывает ряд глубоких изменений в архитектуре цементного камня. Межзерновые пространства сокращаются, капиллярные пространства быстро исчезают, переходная зона между заполнителем и цементной основой приобретает плотность, близкую к монолитной, а развитие кристаллов портландцемента — как по количеству, так и по размерам — резко тормозится [72].

Такое структурное изменение кардинально восстанавливает эксплуатационные характеристики бетона: водопроницаемость снижается до минимально возможного уровня, прочность на сжатие и изгиб увеличивается, а стойкость к разрушающим агентам — кислотам, солям и температурам — достигает качественно нового уровня. Кроме того, радикальное снижение общей пористости препятствует проникновению влаги и агрессивных веществ в арматурный каркас, тем самым в несколько раз продлевая срок службы железобетонных изделий.

В нескольких исследованиях изучалось влияние высоких доз микрокремнезема в диапазоне 10–15% от слизи. Так, в исследовании [77] было отмечено активное смачивание цементной матрицы в течение первой недели твердения, что могло увеличить прочность бетона вдвое в условиях равномерной влажности и тепловой обработки.

Трансформация структуры цемента в образование пространственных координационных колец активизируется под действием микрокремнезема, который действует как тиксотроп и активатор процессов гидратации. Использование этих кремнеземных фрагментов не только способствует уплотнению материала, но и приводит к каскадному образованию силовых цепей, охватывающих всю объемную структуру цементного камня. Эти эффекты, как отмечено в [77], приводят к формированию замкнутой морфологии, в которой каждый микропористый узел служит связующим звеном в единой силовой структуре. Сочетание микрокремнезема с многофункциональными суперпластификаторами позволяет добиться особенно мощного эффекта: их совместимость кардинально меняет физико-химические свойства бетонной массы. Сжатие до 150 МПа, абсолютная водостойкость и оптическая стойкость к истиранию не только доступны, но и становятся стандартом [78].

Дополнительные исследования [79] указывают на участие поверхностно-активных веществ в структурной химии системы. Эти вещества существенно влияют на энергетический ландшафт агрегатных частиц, вызывая реорганизацию поверхности и повышая молекулярную реакционную способность. Воздействие основания приводит к хаотической аморфизации частиц цемента, нарушению устойчивых кристаллических образований и глубокому разрыву связей между частицами. Эти процессы не только

предотвращают комкование, но и обеспечивают максимальную равномерность распределения компонентов. В результате получается бетон с выраженными барьерными свойствами, способный противостоять агрессивным внешним воздействиям. Рекомендации исследователей весьма прагматичны: увеличение доли микрокремнезема до 10% и параллельное снижение водоцементного отношения за счет высокоэффективных поверхностно-активных веществ позволяет резко повысить плотность и компактность структуры, исключив при этом водоотдачу даже в смесях высокой твердости.

В.Г. Батраков и С.С. Каприеловымпрактическое применение органоминеральных модифицирующих добавок, разработанных фирмой «Каприл», было продемонстрировано при использовании составов серии МБ, таких как МБ-01 и МБ-с, в основе действия которых лежит взаимодействие микрокремнезема с пластифицирующим компонентом С-3. Изменение концентрации суперпластификатора в этих смесях привело к появлению ряда модификаций (МБ-6-01, МБ-8-01, МБ-10-01), каждая из которых подбиралась с упором на конкретные задачи по изменению технологических и реологических свойств цементной системы. Доля модификатора в цементе может достигать 30 %. Использование МБ-01 в максимальных дозировках увеличивает прочность бетона до 20 % и повышает пластичность смеси на 25–110 %. Применение такого модификатора оправдано при строительстве сооружений с особыми требованиями к прочности и пластичности. Однако массовое применение ограничено высокой стоимостью, существенно влияющей на себестоимость бетона [80].

Из-за высокой стоимости использования микрокремнезема с добавками сверхпластичности растет интерес к стратегиям, включающим модификацию самого кремнезема, особенно путем химической активации в жидкой реакционной среде [81,82]. Особое внимание уделено системам, в которых активным компонентом является аморфный диоксид кремния, содержание которого составляет более 92%. Как показано в [81], поведение материалов на основе кремния в водных растворах, в том числе в кислотах и щелочах, а также в присутствии катализаторов демонстрирует отчетливые структурные изменения. При взаимодействии со щелочами на поверхности частиц происходит направленная хемосорбция гидроксильных ионов, что нарушает первичную структуру связей Si–O и способствует повышению координационного состояния кремния — за пределы стандартного тетраэдрического окружения.

Исследование характеристик микрокремнеземистых пуццоланов [83] подтвердило их эффективность в сочетании с суперпластификаторами и различными методами активации. Было показано, что добавление микрокремнезема в бетонные смеси увеличивает плотность и улучшает гидравлические характеристики, тем самым повышая общую эксплуатационную надежность бетонного изделия.

1.4 Выводы по главе I

Одной из наиболее острых проблем в водном хозяйстве Казахстана остается изношенность инфраструктуры мелиоративных систем, в частности водохранилищ, работающих на пределе своих ресурсов и утративших за последние два с половиной десятилетия свои подъемные и гидравлические свойства. Анализ текущей ситуации показывает системную необходимость реконструкции каждого четвертого элемента. Эта реальность ставит острую инженерную и научную задачу — создать литой бетон с принципиально иными эксплуатационными свойствами, способный выдерживать агрессивные нагрузки, присущие гидротехническим сооружениям.

Основным направлением такого преобразования является проектирование микроструктуры бетона не как побочного эффекта твердения, а как управляемой системы с определенными параметрами. В его основе лежит полифракционное цементное вяжущее, содержащее строго подобранные фракции и трехкомпонентную модифицирующую композицию, которые синергически взаимодействуют с суперпластификатором, функциональным полимером и высокоактивным микрокремнеземом. Такой подход направлен не на улучшение отдельного свойства, а на полную перестройку всей структуры — от текучести в новом состоянии до плотности и коррозионной стойкости в закаленном состоянии.

Ключевым моментом является не только снижение водоцементного отношения, но и резкое увеличение доли твердой фазы по мере приближения упаковки частиц к максимальному пределу плотности. Формирование многоуровневой архитектуры зерен с наличием остаточных крупных фракций позволяет создать внутри массива долговременный прочностной каркас, компенсирующий эксплуатационные напряжения и работающий с эффектом внутреннего самовосстановления.

В цементной матрице, армированной микрокремнеземом МК-95, наблюдается резкое сокращение капиллярного пространства, устранение слабых переходных зон и образование химически инертной, пространственно организованной оболочки, устойчивой к воздействию кислот, солей и теплопередачи. Речь идет не только о повышении эксплуатационных характеристик — речь идет о переходе на новый класс бетона, который адаптирован к суровым водным условиям и может сохранять структурную целостность в течение десятилетий без потери прочности или долговечности.

ГЛАВА II КЛАССИФИКАЦИЯ ИСХОДНОГО СЫРЬЯ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ СТРАТЕГИЯ

2.1 Методы исследований

Методология исследования свойств компонентов и композиций основана на системном подходе, базирующемся на существующих правилах. Для обеспечения воспроизводимости результатов и их прикладной значимости был проведен детальный анализ как исходных материалов, так и готовых литейных и бетонных смесей с измененным составом. Подбор и расчет состава производился с учетом не только физико-технических требований отрасли, но и нюансов производственной инфраструктуры конкретного региона, с учетом свойств активных компонентов — от минеральных связующих и инертных наполнителей до синергических химических веществ. Представленные в таблицах 2.1 и 2.2 методические подходы и комплексы испытаний отражают все процедуры, используемые для комплексной оценки технологических и прочностных показателей исследуемых систем.

Таблица 2.1-Методы, используемые для исследования компонентов сырья

Свойства исходных материалов	**Методики испытаний**
Отбор проб цементного вяжущего состава	ГОСТ 30515-2013
Определение показателя нормальной густоты	ГОСТ 30744-2001
Контроль стабильности объёмных изменений	ГОСТ 30744-2001
Оценка степени помола	ГОСТ 30744-2001
Испытания на раннюю и проектную прочность	ГОСТ 30744-2001
Определение истинной и насыпаемой плотности	ГОСТ 30744-2001
Измерение сроков начала и завершения схватывания	ГОСТ 30744-2001
Оценка радиационной активности	ГОСТ 30108-94
Изучение физико-механических характеристик песка	ГОСТ 8735–88
Контроль свойств щебня (прочностные и морозостойкие показатели, форма зёрен)	ГОСТ 8269.0-97
Анализ качества воды для затворения	ГОСТ 23732-2011
Оценка действия модифицирующих компонентов	ГОСТ 30459-2008
Изучение гранулометрического состава порошкообразных материалов	Метод лазерной гранулометрии

Таблица 2.2 - Методы, используемые для испытания бетона

Изучаемые характеристики бетонной смеси и затвердевшего бетона	**Применяемая методика испытаний**
Подбор оптимального состава смеси	Математическое планирование эксперимента (ортогональное проектирование второго порядка)
Моделирование зерновой структуры и расчет оптимальной дисперсности	Программный алгоритм на основе модифицированного метода

	DropAndRoll
Отбор образцов свежей смеси	ГОСТ 10181-2014
Проверка удобоукладываемости	ГОСТ 10181-2014
Определение средней плотности бетонной смеси	ГОСТ 10181-2014
Тестирование прочности на сжатие	ГОСТ 10180-2012
Оценка прочности на изгиб при растяжении	ГОСТ 10180-2012
Анализ характеристик трещиностойкости	ГОСТ 29167-21
Испытание на водонепроницаемость	ГОСТ 12730.5-2018
Измерение водопоглощения	ГОСТ 12730.3-2020
Изучение коррозионной стойкости	ГОСТ 31383-2008, ГОСТ 27677-88
Анализ фазового состава цементного камня	Рентгенофазовый метод

Основные этапы — от изготовления опытных серий до углубленного анализа испытаний — сосредоточены в лабораторных условиях кафедры «Экспертиза строительных материалов и конструкций» Института строительства. М. Ауэзова, а также в научных подразделениях Санкт-Петербургского государственного университета прикладных наук, специализирующихся на прогрессивных методах формования бетона. На производственной площадке АО «Жоровобетон-1» (г. Алматы), работающей в условиях современного промышленного цикла, реализуются технологические решения, направленные на проведение масштабных испытаний составов литьевого и сборного железобетона в реальных условиях.

2.1.1 Получение тонких фракций клинкерного компонента

С целью формирования тонкодисперсных составляющих клинкерного вяжущего применялась дисковая вибрационная мельница, обеспечивающая стабильный помол до заданной степени измельчения (рис. 2.1).

Рисунок 2.1 –дисковая вибрационная мельница, FRITSCH Pulverisette 7

Для сверхтонкого измельчения твёрдых, среднетвёрдых, хрупких, мягких и умеренно влажных материалов использовалась дисковая вибрационная мельница, работающая по принципу ударного разрушения. Основные технические параметры установки включают: объём загрузки до 250 мл, предельно допустимую фракцию исходного материала — до 12 мм, с получением конечной крупности менее 1 мкм. Диапазон оборотов двигателя составляет от 600 до 1500 об/мин. Габаритные размеры установки — 77×76×116 см. В качестве измельчающих элементов применялись сосуд с ударными кольцами, изготовленными из различных износостойких материалов: закалённой стали, агата, инструментальной стали, окиси циркония и карбида вольфрама. Оборудование произведено в Германии в 2020 году.

Оценка удельной поверхности и размера частиц портландцементного клинкера проводилась согласно общепринятой в международной практике методике газопроницаемости Козени — Кармана с использованием прибора дисперсионного анализа модели ПСХ-12 (рис. 2.2).

Рисунок 2.2 – Прибор ПСХ-12

Коэффициент газопроницаемости образцов с открытой пористостью либо порошковых слоёв определяется по длительности фильтрации воздушного потока сквозь исследуемый материал при строго заданных начальных и конечных значениях разрежения в рабочем объёме прибора [84]. Прибор характеризуется следующими параметрами:

Диапазон измеряемых величин:

– удельная поверхность, см²/г

– среднемассовый размер частиц, мкм

– коэффициент газопроницаемости, дарси

Инструментальная погрешность, %

Средняя погрешность измерений, %

Область применения включает анализ широкого спектра дисперсных материалов строительного и иного назначения, таких как цемент, гипс, известняк и др. В конструкции прибора применён высокоточный

безынерционный датчик давления, а также специальный температурный сенсор, который автоматически корректирует значения вязкости воздуха с учётом текущих условий, тем самым обеспечивая точность при расчётах удельной поверхности и газопроницаемости порошковых образцов.

2.1.2 Моделирование упаковок и расчёт оптимальной гранулометрии

Для изучения гранулометрического состава и проектирования бидисперсных плотных упаковок фракций клинкерного компонента использовался программный комплекс, основанный на модифицированном алгоритме DropAndRoll. Данный метод реализует принцип последовательного заполнения объёма с использованием сферических частиц, случайным образом размещаемых в заданной расчетной области. При этом положение каждой новой частицы выбирается с учётом столкновений и контактов с уже размещёнными элементами [85].

На входе алгоритма задаются геометрические параметры области моделирования, количество и характеристики частиц каждой фракции. По итогам моделирования формируется массив, включающий координаты центров всех сфер, их радиусы, а также индексы частиц, находящихся в контакте. Такой подход позволяет достичь оптимизации гранулометрического распределения в цементных системах, способствуя формированию плотной упаковки и более равномерному распределению компонентов по объему материала.

2.1.3 Рентгенофазовый анализ

Анализ фазового состава цементного камня, полученного с применением полидисперсного вяжущего, выполнялся методом рентгенофазового анализа (РФА) с использованием порошкового рентгеновского дифрактометра модели Proto AXRD Benchop. Оборудование оснащено системой с изменяемым радиусом гониометра, что позволяет варьировать настройки: 143 мм — для усиления интенсивности дифракционных линий, и 191 мм — для получения более чёткого разрешения пиков, включая реализацию методики GrazingIncidenceDiffraction (метод скользящего пучка).

Дифрактометр Proto AXRD Benchop обеспечивает характеристики, соответствующие уровню полноразмерных лабораторных приборов: пиковое разрешение до FWHM < 0,04° 2θ и угловая точность измерений < ± 0,02° 2θ в пределах полного диапазона углов. Перед анализом цементный камень измельчался до порошкообразного состояния. Полученные дифрактограммы обрабатывались в специализированном программном обеспечении для расшифровки и последующей идентификации фазовых компонентов [86].

2.1.4 Исследование физико-механических характеристик бетонных образцов

Для оценки прочностных характеристик литого модифицированного бетона применялась универсальная испытательная установка производства компании Controls S.p.A. (Италия), оснащённая одной рамой и обеспечивающая максимальную нагрузку до 200 МПа. Устройство предназначено для автоматизированного проведения испытаний образцов на сжатие, изгиб, косвенное растяжение и определения модуля упругости. Также установка позволяет выполнять испытания с контролем перемещения и напряжения, что делает возможным комплексную оценку различных типов строительных материалов в соответствии с требованиями нормативного документа [87].

Рисунок 2.3 – Автоматическая испытательная система Controls (Italy)

После завершения стандартного 28-дневного цикла твердения были изготовлены кубические модели размером 100 × 100 × 100 мм для оценки прочности на сжатие. Для каждого варианта бетонной смеси было подготовлено по три серии образцов. Процесс приготовления экспериментальных составов соответствовал общепринятым методикам и включал дозирование компонентов по массе и равномерное перемешивание до получения однородной структуры.

Перед началом механических испытаний образцы кубической формы закрепляются на основании пресса с помощью направляющих приспособлений для выверенного выравнивания по оси будущей нагрузки. Верхняя плита машины опускалась до соприкосновения с противоположной стороной испытуемого объекта, строго обеспечивая равномерный контакт и распределение давления по всей площади контакта. Мощность воздействия увеличивалась в строго охраняемом диапазоне (0,6 + 0,2) МПа/с, без тряски, и продолжалась до ее снятия согласно установленному техническому регламенту [87].

Для анализа прочности на изгиб использовались призматические тела размерами 100x100x400 мм. Количество избираемых единиц регулировалось допустимой степенью внутрипартийной диспропорции. Каждому экземпляру был присвоен уникальный идентификационный номер. Геометрия была тщательно проверена: неровность торцов не превышала 0,001; Кривизна цилиндрических поверхностей в образцах на изгиб ограничивалась 0,2 мм; Перпендикулярность торцевых и опорных поверхностей сжатых цилиндров не превышала + 1 мм.

Кроме того, использовался испытательный стенд ZVICK серии Z010 Proline (см. рис. 2.4), оснащенный электромеханическим приводом и способный выдерживать нагрузку до 10 кН. Рабочая зона составляет 1045 мм (без захватов), максимальная скорость разгруженного автомобиля достигает 2000 мм/мин. Управление реализовано в виде адаптивного модуля, что позволяет точно настраивать динамику мощности в зависимости от механических свойств образцов.

Рисунок 2.4 – Испытательная машинаZwick Z010 серии Proline

Нагружение призматических образцов осуществлялось до момента разрушения с контролируемым увеличением нагрузки, поддерживаемым на уровне (0,05±0,01) МПа/с. По завершении испытательного цикла проводился анализ полученных данных и их последующая интерпретация. Расчёт прочности на растяжение при изгибе R_{tb}производился с округлением до сотых долей мегапаскаля на основании выражения (2.1):

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

где: F — сила, вызывающая разрушение образца, выраженная в ньютонах;

a, b и l — параметры, соответствующие ширине, высоте и расстоянию между опорами призмы соответственно; все значения указаны в миллиметрах и необходимы для оценки прочности на изгиб;

δ- масштабный поправочный коэффициент для преобразования полученной мощности в опорное значение, характерное для объектов контроля и стандартных размеров выборки;

KW - коэффициент, используемый только при работе с сетчатым бетоном для учета степени влажности при испытаниях; не включены в объем данного анализа.

Исследование показателей светостойкости в условиях статического нагружения проводилось на основании методических указаний [88]. Для этого использовались призматические образцы размером 100×100×400 мм. Это соответствует максимальному размеру фракции крупных единиц 10,0 мм. Для каждого состава бетона была сформирована серия из четырех образцов. Глубина предварительного надреза составила 25 мм, а ширина — 2 мм. В призматических конструкциях допускаются верхние срезы в соответствии с требованиями испытаний на несбалансированность типа 1.

Экспериментальная часть исследования светостойкости проводилась на базе технической базы испытательного центра г. Санкт-Петербурга. Основной технической платформой для испытаний стала сервогидравлическая система модели Advantest 9 (тип 50-c9843), наглядно представленная на схеме (рис. 2). 2.5). Все экспериментальные процедуры проводились при температуре 20 градусов Цельсия, с допустимым отклонением до +5 градусов. При этом относительная влажность воздуха в помещении не опускалась ниже 50%, что соответствует нормативным параметрам стандартной лабораторной среды.

Рисунок 2.5 –Сервогидравлическая система ADVANTEST 9 50-C9843

Линейные размеры образцов утверждены с погрешностью не более 1 мм. Смещения контролировались с точностью до 0,01 мм, а приложенные силы измерялись с допустимым отклонением менее 1% от максимальной приложенной силы в процессе испытания. Регулировка скорости загрузки осуществлялась путем регулировки перемещения верхней плиты пресса, а заданный диапазон скоростей варьировался от 0,02 до 0,2 мм/с. Общая

продолжительность каждого цикла испытаний составляет не менее 1 минуты для обеспечения стабильности работы и минимизации влияния динамических факторов. При испытаниях на дисбаланс, проведенных на образцах категорий 1–4, непрерывная нагрузка прикладывалась до момента окончательного разрушения, т.е. полного раскола объекта на фрагменты. В этот момент фиксировалось значение критического усилия, обозначаемого как F_c^*. Визуальное представление процесса на рисунке 2.6.

Рисунок 2.6 – Разделение образца-призмы на части

Оценка показателей светостойкости при испытаниях образцов типа 1 на дисбаланс проводилась с использованием соответствующей расчетной зависимости, учитывающей критическое состояние материала при максимальной нагрузке:

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

Где: Kc отражает критический коэффициент интенсивности напряжений в момент достижения предельной нагрузки, измеряемый в МПа×м⁰.⁵. Величина Fc* указывает на нагрузку, при которой в динамических условиях запускается рост магистральной трещины (в меганьютонах). Геометрические параметры b, t, L_0, L и D обозначают линейные размеры испытуемого тела (в метрах). Показатель a_0 характеризует длину исходного надреза, тогда как λ, определяемая как отношение a_0/b, представляет собой относительное значение этого параметра. Величина Kc* трактуется как условный коэффициент интенсивности напряжений, получаемый на основе введённых значений.

2.1.5 Испытание литого модифицированного бетона на морозостойкость

Оценка стойкости литого модифицированного бетона к циклическому замораживанию проводилась на основе метода, заключающегося в многократном попеременном воздействии низких и положительных температур на водонасыщенные образцы. Все этапы испытаний, включая регистрацию и интерпретацию результатов, проводились в строго регламентированных

условиях, соответствующих требованиям нормативных положений, изложенных в источнике [89].В рамках эксперимента проводилось насыщение водой, замораживание проводилось в воздушной среде при температуре -18 ± 2 °C, а процесс оттаивания проводился в водной среде при температуре 20 ± 2 °C. Марку бетона по морозостойкости определяют по результатам испытаний образцов-кубов с размерами стенок 100x100x100 мм. Каждая исследовательская группа состояла из шести контрольных образцов и 12 основных образцов. Первичные образцы погружались в воду перед началом цикла замораживания, тогда как контрольные образцы погружались поэтапно перед испытанием на прочность. Сначала их погружали на одну треть высоты на 24 часа, затем уровень воды поднимали до двух третей высоты и поддерживали в таком положении еще сутки, а затем уровень воды поднимали не менее чем на 20 мм выше верхней поверхности образца и насыщали в течение 48 часов. Продолжительность одного полного цикла включала фазу замораживания продолжительностью не менее 2,5 часов, за которой следовал интервал оттаивания продолжительностью 2 + 0,5 часа. При появлении на поверхности испытуемых образцов признаков разрушения — отслаивания, трещин или появления сколов — такие образцы немедленно изымались из дальнейших экспериментов.

2.1.6 Определениеводопоглощения и водонепроницаемости бетона

Оценка водостойкости проводилась методом «мокрого пятна» согласно требованиям стандарта [90]. Для этой цели использовалась цилиндрическая модель диаметром 150 мм и высотой 150 мм, которая была выбрана равной 20 мм с учетом максимального размера агрегата. Образцы предварительно хранились в лаборатории в течение 1 дня, а затем помещались в обычную камеру для выдерживания при температуре 20±2 °C и относительной влажности 95±5%. Применяемая схема нагружения предусматривала ступенчатое увеличение давления: интервал между ступенями составлял от 1 до 5 минут, шаг нагрузки – 0,2 МПа, время выдержки на каждой ступени достигало 12 часов. Критерием оценки служило максимальное давление, зафиксированное в момент, когда вода переставала поступать за образцы. При этом не допускались даже самые малые следы фильтрации — капли и мокрые пятна. Окончательное значение водонепроницаемости определялось уровнем давления, при котором не менее четырех из шести испытанных объектов оставались полностью герметичными.

Анализ водопоглощения проводили по трехступенчатому методу измерений [91] с использованием образцов в виде кубиков размером 100x100x100 мм, размером до 20 мм, что соответствует верхнему пределу фракции наполнителя. Каждый образец полностью погружался в воду, температурный режим стабилизировался на уровне 20+2°C, слой жидкости превышал верхнюю поверхность образца не менее чем на 50 мм. Объемная

фиксация проводилась ежедневно и прекращалась только в том случае, если два последовательных измерения показывали небольшую разницу. 0,1%. Величину объемного водопоглощения (ВВ) рассчитывали по формуле (2.3), при этом погрешность метода не превышала установленного предела на 0,1%.

$$W_{\text{м}} = \frac{m_c - m_{\text{в}}}{m_c} * 100, \qquad (2.3)$$

Где: Wм – влагопоглощение образца по массе, %

mc – масса после сушки, г

mв – масса после насыщения водой, г.

Для расчета водопоглощения для каждой серии бетонных составов использовался средний результат, определяемый как среднее арифметическое отдельных измерений для каждого образца.

2.1.7 Определение коррозионной стойкости бетонных образцов

В рамках методики, изложенной в [92], была реализована схема определения коррозионной стойкости образцов бетона путем сравнения изменения их свойств после хранения в агрессивной среде с параметрами контрольной серии в нейтральных условиях. Для каждой опытной группы планировалось подготовить три основных и три контрольных образца, выполненных в виде бетонных кубов со стороной 100 мм, в соответствии с ограничениями по размерам используемых заполнителей.

Экспериментальные процедуры начались после завершения стандартного 28-дневного периода отверждения. В качестве агрессивных компонентов были выбраны: 5%-ный раствор сульфата натрия (налсоокс), 3%-ный раствор хлорида натрия (NaCl), слабокислый 0,01 М раствор соляной кислоты (HCl) и очищенная вода. В качестве фоновой нейтральной среды использовалась бутилированная питьевая вода, регламентируемая ГОСТ 32220-2013.

Перед началом основного периода испытаний все образцы были предварительно высушены и проведены контрольные измерения. Кроме того, три контрольных образца каждой смеси были испытаны на прочность при сжатии и прочность на растяжение при изгибе. Основной образец погружали в соответствующий раствор таким образом, чтобы коррозионная среда могла обходить поверхность со всех сторон. Период технического обслуживания составил шесть месяцев, в течение которых осуществлялся постоянный контроль состояния бетонных конструкций.

Анализ результатов включал количественную идентификацию массы образцов до и после воздействия, что позволило оценить степень деградации материала. Потерю массы (Δm) рассчитывали: (2.4).

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\ \%, \quad (2.4)$$

Где: Δm — процентное уменьшение массы исследуемых образцов;
m_1 — масса образца перед началом воздействия, г;
m_2 — масса образца по завершении испытаний, г.

Далее по ходу исследования необходимо было определить, каким образом изменяются показатели предельной прочности на сжатие (ΔR, %) и растяжение при изгибе (ΔR_tb, %). Для этого использовались аналитические зависимости, представленные в формулах (2.5) и (2.6).

$$\Delta R = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \times 100\ \%, \quad (2.5)$$

где: ΔR — относительное снижение прочности при сжатии, %;
R_1 — прочность на сжатие контрольных экземпляров до начала воздействия, МПа;
R_2 — прочность на сжатие испытуемых образцов после завершения воздействия, МПа.

$$\Delta R_{tb} = \frac{R_{1\,tb} - R_{2\,tb}}{R_{1\,tb}} \times 100\ \%, \quad (2.6)$$

где: ΔR_tb — относительное отклонение прочности на изгиб при растяжении, %;
R_1_tb — предельное значение прочности на изгиб контрольной группы до начала испытаний, МПа;
R_2_tb — соответствующий показатель для основной серии после завершения испытательного цикла, МПа.

2.2 Классификация исходных материалов

2.2.1 Портландцементный клинкерный компонент

В рамках исследования использовались портландцемент марки I 42,5 H ЦЕМ и клинкер производства ТОО «Стандарт Цемент» (г. Шымкент, Республика Казахстан), свойства которых соответствуют требованиям, установленным в нормативном документе [93]. Было проведено несколько лабораторных испытаний, чтобы убедиться, что используемый портландцементный клинкер соответствует заявленным стандартам. Анализ химического состава клинкера [94,95] проводился по указанным методикам. Для оценки количественного состава основных силикатных фаз, таких как тройной силикат кальция (C3S) и двойной силикат кальция (C2S), были использованы следующие зависимости, рассчитанные на основе массовых соотношений оксидов: C3S = 4,07CaO - (7,6SiO2 + 6,7Al2O3 + 1,42Fe2O3); C2S

= 8,6SiO2 + 5,07Al2O3 + 1,07Fe2O3 - 3,07CaO. Полученные значения, характеризующие химико-минералогический состав клинкера и его соответствие требованиям к сырьевым компонентам вяжущих материалов, приведены в табличных данных 2.3 и 2.4.

Таблица 2.3-Данные испытаний цемента типа I Cem 42,5 N

Характеристика	**Норма по ГОСТ 31108-2020**	**Измеренное значение**
Процент остатка на сите 45 мкм	Не регламентирован	3,1
Процент остатка на сите 80 мкм	Не установлен	0,5
Норма воды для стандартной консистенции, %	Не указана	26,0
Расширение по тесту Ле-Шателье, мм	Не более 10	7
Удельная поверхность (метод воздушной проницаемости), см²/г	Не нормирована	3500
Старт схватывания, мин	Не ранее 60	165
Завершение схватывания, мин	Не регламентировано	480
Наличие ложного схватывания	Отсутствует	Отсутствует
Прочность на сжатие через 2 суток, МПа	Минимум 10	26,7
Прочность на сжатие через 28 суток, МПа	42,5–62,5	45,4
Истинная плотность, кг/м³	Не нормирована	3150
Насыпная плотность, кг/м³	Не задана	1250

Анализ полученных экспериментальных результатов испытаний показал, что исследуемый цемент соответствует требованиям [93].

Таблица 2.4 - Результаты испытаний цементного клинкера портландцементного типа

Наименование показателя	**Требование ГОСТ 34850-2022**	**Фактическое значение**
Содержание оксида магния (MgO), %	не более 5,0	3,0
Уровень свободного оксида кальция (CaOсв), %	не более 2,0	1,5
Отношение CaO/SiO_2, %	не менее 2,0	2,5
Суммарное содержание силикатов кальция ($3CaO \cdot SiO_2 + 2CaO \cdot SiO_2$), %	не менее 67	70
Эффективная активность радионуклидов, Бк/кг	не более 370	не более 370

Для регулирования скорости схватывания цементной системы в испытуемые составы дополнительно вводят компонент на основе сульфата кальция. В этой роли были использованы две водные штукатурки (казуокс·2Н ИСО), физико-химические показатели которых соответствуют рецептурам, указанным в действующих нормативных документах [94, 95].

2.2.2 Крупный и мелкий заполнитель

В рамках экспериментального этапа работ в качестве мелкофракционного заполнителя использовался природный песок, предоставленный производителем «Арна» из Туркестанской области (Республика Казахстан). Анализ параметров данного материала проводился на основе установленных методик, установленных в нормативных документах [96]. Обобщенные данные, характеризующие основные физико-механические свойства изученных песков, представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5– Результаты испытаний песка

Поставщик сырья	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
ТОО «Арна»	2,5	2612	1660	1,1	75,1

Данные показатели являются приемлемыми для использования исследуемого заполнителя в литых бетонных смесях [1].

Таблица 2.6 – Химический состав песка

Производитель	Основные оксиды, %								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	п.п.п
ТОО «Арна»	71,14	15,30	2,70	2,50	0,65	0,01	3,30	2,70	1,70

По результатам санитарно-гигиенической экспертизы исследуемый образец песчаного материала отнесен к 1 уровню радиационной безопасности. Данный вывод сделан на основании того, что удельная активность естественных радионуклидов, обнаруженных в пробе, не превысила максимально допустимого нормативного значения 370 Бк/кг, регламентируемого действующими требованиями. Комплекс таких показателей, как количество глинистых и пылевидных частиц, гранулометрический состав, радиационная стойкость, позволяет говорить о том, что данный песок соответствует установленным строительным нормам [96]. В качестве крупной фракции в бетонной смеси использовался гранитный щебень зернистостью от 5 до 15 мм, поставленный производственным предприятием (ООО) «ТУСКУМ». Оценка их характеристик проводилась в соответствии с положениями нормативного акта [98], обобщенная характеристика полученных результатов приведена в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Свойства гранитного щебня, используемого в качестве крупного заполнителя

Измеряемый параметр	Зафиксированное значение
Процентное содержание пластинчатых и игловатых зерен	11,0
Доля пылевидных и глинистых включений, %	0,81
Присвоенная марка по дробимости	1400
Показатель морозостойкости	400
Плотность в насыпном состоянии, кг/м³	1405
Активность радионуклидов по удельной эффективной активности, Бк/кг	89
Категория истираемости по маркировке	И-1

2.2.3 Вода затворения

В процессе приготовления бетонных смесей использовалась жидкость, функции которой выполняла очищенная вода, параметры которой строго соответствовали рамкам нормативных указаний, установленных в Стандарте [99]. По аналитическим данным наличие сульфатных соединений, выраженных в виде SO_4 , не превышает ПДК 2650 мг/л, а уровень соленасыщенности не превышает 4900 мг/л. Образец не содержал следов маслянистых примесей, не имел признаков осадка и характеризовался полной прозрачностью. Кислотность среды поддерживалась на уровне pH = 7,7. Содержание органических загрязняющих веществ не превысило 14 мг/л, что подтверждает соответствие качества воды требованиям строительного назначения.

2.2.4 Пластифицирующая добавка поликарбоксилатная «AR 122»

Для замены бетонной смеси использован пластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров производства ООО «Арирангрупп» (г. Астана) под торговым наименованием АР 122. Рассматриваемое изделие соответствует требованиям, регламентированным стандартом [34], и характеризуется рядом технических и функциональных показателей, перечисленных в таблице 2.8.

Таблица 2.8-Параметры физико-химических свойств гиперпластификатораAR122

Характеристика	**Зафиксированное значение**
Визуальные особенности	Однородная жидкость желтоватого оттенка
Плотность при температуре 25 °C, кг/м³	1040
Уровень водородного показателя (pH)	3,6
Максимальное содержание хлорид-ионов, %	≤ 0,1

В состав смеси Ar 122 входит усовершенствованный конверторный компонент, являющийся одним из высокоэффективных реагентов последнего

поколения. В его основе лежат поликарбоксилатные эфиры, которые имеют широкий спектр применения в бетонах различного назначения и обладают выраженным пластифицирующим эффектом.Смесь обеспечивает быстрый набор прочности на ранних стадиях твердения, улучшенное сцепление компонентов и максимальное самоуплотнение бетонной смеси при минимальных затратах. Фактически, было обнаружено, что Ar 122 лучше всего работает в системах на основе портландцемента из различных источников. Эта добавка была специально разработана для улучшения пластичности и водопоглощения цементных составов, не оказывая отрицательного влияния на прочностные характеристики или время твердения бетона. С точки зрения охраны здоровья и безопасности AR 122 классифицируется как неопасное вещество и относится к классу опасности 4 по стандарту[100]. Смесь не вступает в реакцию с образованием токсичных соединений в воздухе или сточных водах и не влияет на токсичные и гигиенические свойства свежего и затвердевшего бетона.

2.2.5 Полимерная добавка «Повидон-К30»

В качестве водорастворимого полимерного компонента используется фирменное вещество Повидон К30, производимое китайской компанией ANA International. Это высокомолекулярный синтетический полимер с молекулярной массой от 1 300 000 до 2 000 000 и вязкостью от 4 000 до 5 000 мПа·с при 25 °C. Повидон К30 представляет собой высокогигроскопичный, белый или слегка желтоватый порошкообразный раствор поливинилпирролидона. Это синтетический материал, который легко растворяется в воде и полярных растворителях, хорошо смешивается со спиртом и хлороформом, но плохо взаимодействует с эфиром. Его основные физико-химические свойства включают молекулярную формулу C и молярную массу в диапазоне 2500–2000. 000 г/моль, плотность около 1200 кг/м3, температура плавления 150-180°C. Поливинилпирролидон широко применяется в различных областях благодаря своей универсальности и безопасности для организма человека. В частности, они используются в фармацевтической промышленности в качестве связующих и диспергирующих агентов для улучшения растворимости и биодоступности активных ингредиентов. Он содержится в сиропах, мягких желатиновых капсулах и таблетках для повышения эффективности доставки лекарств, включая антибиотики, обезболивающие и цитостатики[101].

В промышленном секторе поливинилпирролидон широко используется при производстве различных клеевых составов, таких как клеевые стержни и клеи-расплавы. Вот некоторые компоненты, используемые при производстве аккумуляторов, стекловолокна, керамики, чернил и бумаги, особенно в технологии струйной печати. Кроме того, поливинилпирролидон участвует в формировании мембранных материалов и используется, например, в системах диализа и фильтрации воды. Он действует как эмульгатор и разрыхлитель в

процессе полимеризации раствора. Кроме того, полимер используется в производстве электронно-лучевых трубок, добавляется в составы биологически активных веществ, а также используется в антидотах благодаря своим выраженным адсорбционным свойствам.

2.2.6 Отход ферросплавного производства — микросилика МК-95

При разработке литого модифицированного бетона в качестве высокодисперсного минерального компонента использовался микрокремнезем марки МК-95 производства ТОО «Тау-Кен Темир» (г. Караганда, Республика Казахстан), соответствующий требованиям стандартов [102]. Смесь является побочным продуктом процесса восстановления высокочистого кварца с использованием восстановителя на основе углерода в электродуговых печах, где производятся кремний и его ферросплавы. Основу микрокремнезема составляют сверхтонкие сферические частицы, содержащие не менее 85% своей общей массы в виде аморфного или стекловидного кремнезема (SiO_2). Подробные характеристики MICROSSILICA MK-95 приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Характеристики микросилики марки МК-95

Обозначение характеристик	**Показатели качества**
Содержание диоксида кремния (SiO_2), %, не ниже	95,5
Доля оксида фосфора (P_2O_5), %, максимум	0,08
Содержание оксида магния (MgO), %, максимум	0,75
Доля оксида алюминия (Al_2O_3), %, максимум	0,16
Содержание оксида железа (Fe_2O_3), %, максимум	0,1
Массовая доля серного ангидрида (SO_3), %, максимум	0,44
Доля оксида кальция (CaO), %, максимум	0,26
Содержание свободных щелочей (Na_2O, K_2O), %, максимум	1,2
Массовая доля воды, %, максимум	0,4

2.2.7 Микроармирующие волокна в виде полипропиленовой фибры

Для предотвращения образования и распространения трещин в модифицированной литой бетонной конструкции на этапе сухого смешивания цементного вяжущего с различным количеством заполнителей вводились микробные элементы. Использованное волокно, разработанное ООО «Фибролюкс» (Санкт-Петербург), применялось в соответствии с ранее установленными рекомендациями [102]. Описание внешнего вида материала приведено на рисунке 2.7, а основные физико-механические свойства обобщены в таблице 2.10.

Рисунок 2.7 – Внешний вид полипропиленовой фибры

Таблица 2.10 - Физико-механические свойства полипропиленового волокна

Наименование параметра	**Значение для полипропиленовой фибры**
Температура плавления, °С	160
Длина волокон, мм	12
Химическая устойчивость (щелочи, коррозия)	Низкая
Средний диаметр волокон, мкм	60
Диапазон удлинения при разрыве, %	23–35
Прочность на растяжение, МПа × 10^3	0,57
Плотность материала, г/$см^3$	0,91
Модуль упругости, МПа × 10^3	3,5

ГЛАВА III УСЛОВИЯ И ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СОСТАВА ЛИТОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТХОДОВ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

3.1 Предпосылки для модифицирования литого бетона

К видам самоуплотняющихся смесей относится литой модифицированный бетон, для которого важно обеспечить высокую прочность, гидроизоляцию и защиту от коррозии. Добавки для монолитных конструкций должны не только соответствовать нормативным требованиям к тяжелому бетону, но и обеспечивать стабильную прокачку через насосное оборудование без потери реологических свойств и риска расслоения.

Одной из ключевых задач при проектировании состава литой смеси является обеспечение её высокой перекачиваемости. Для достижения этого параметра необходимо учитывать ряд технологических факторов:

– оптимальное количество воды в смеси должно быть достаточным для создания непрерывного движения цементной суспензии по трубопроводу. При соблюдении этого условия трение возникает только между внутренней поверхностью трубы и смазывающим слоем раствора толщиной порядка 1–2 мм. Однако чрезмерное водосодержание приводит к расслоению смеси и снижению её прочности, что требует точного подбора водо-вяжущего отношения [103].

– необходима достаточная доля гелеобразной фазы, включающей мелкодисперсные вяжущие и наполнители, обеспечивающие стабильную подвижность и скольжение бетонной массы при перекачивании.

– гранулометрические характеристики крупного и мелкого заполнителя должны обеспечивать плотную упаковку. Промежутки между зернами крупного щебня должны быть максимально заполнены мелким песком и цементным раствором, чтобы избежать образования пустот и обеспечить однородность смеси [104].

Современные исследования показывают, что эффективным направлением в повышении эксплуатационных характеристик ЛМБ является внедрение комплексных химико-минеральных модификаторов [105].

Поэтому перспективным решением для создания высокоэффективных формованных бетонов является технологический подход, заключающийся в включении в состав смеси полидисперсных вязких материалов в сочетании с многофункциональными модификаторами (суперпластификаторами, полимерами, микрокремнеземом). Ингредиенты, участвовавшие в данном исследовании, их роль в процессе производства и их влияние на свойства смеси и бетона во время формирования и затвердевания перечислены в таблице 3.1.

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

Наименование компонента	Функция (проявление)
Полифракционное вяжущее	Первым уровнем в иерархии полидисперсного состава вязких компонентов является крупная фракция с удельной поверхностью около 1500 см2/Г. Включение его в состав смеси обусловлено необходимостью создания запаса клинкерных минералов, способствующих процессу самовосстановления бетонных конструкций, особенно в случае возникновения микротрещин и трещин, связанных с проявлением эффекта самовосстановления. Структура второго уровня концентрирует высокодисперсную фракцию с площадью поверхности около 4500 см2/г, основной функцией которой является заполнение пустот между крупными частицами. Такое распределение компонентов, с одной стороны, позволило усилить начальные стадии гидратации, а с другой стороны, ускорить процессы уплотнения цементного камня за счет быстрого заполнения межзернового пространства. Третий уровень покрытия представлял собой промежуточную дисперсионную фракцию с удельной площадью поверхности около 3000 см2/г. Его добавление позволяет достичь баланса между плотностью покрытия и экономией расхода цемента, что приводит к получению высокопрочного материала при рациональном использовании связующего.
Гиперпластификатор AR 122	Потребность в воде существенно снижается, наблюдается заметная экономия воды и достигается требуемая эффективность бетонной смеси. Он помогает стабилизировать структуру смеси, а также снижает ее проницаемость.

	В результате его применения улучшаются прочностные свойства, повышается устойчивость к холоду и коррозии. Кроме того, эта добавка способствует уменьшению усадочных деформаций и проскальзывания бетона в процессе схватывания и последующей эксплуатации бетона.
Водорастворимая полимерная добавка «Повидон К30»	Направленные изменения структуры порового пространства цементного камня, направленные в сторону его уплотнения, способствуют существенному снижению проницаемости материала. Благодаря усовершенствованиям бетон становится более устойчивым к влаге, циклическому замораживанию-оттаиванию и суровым условиям окружающей среды, а также лучше противостоит замерзанию и коррозии в течение длительного срока службы.
Микросилика марки МК-95	Увеличение плотности цементной матрицы и рост прочности как самого цементного камня, так и бетона на его основе обеспечиваются интенсивным присутствием свободного гидроксида кальция (Са(он)). Данный процесс способствует снижению подверженности материала коррозии первого типа (выщелачиванию), повышая его долговечность и устойчивость к агрессивному воздействию внешней среды.
Полипропиленовое волокно	Введение микроволокон повышает светостойкость, способствует перераспределению и снижению локальных концентраций напряжений в структуре материала. Особенно выраженные эффекты наблюдаются в зонах, склонных к образованию макродефектов, где микроволокна выполняют функцию стабилизирующих элементов, препятствующих возникновению трещин и обеспечивающих равномерное распределение деформаций по всему бетону.

Основным вектором исследований стала разработка рецептуры литого модифицированного бетона, способного также сочетать в себе ряд важных

свойств: обеспечивать необходимую подвижность смеси, демонстрировать высокую физико-механическую прочность, быть водонепроницаемым на открытом воздухе и сохранять устойчивость при воздействии агрессивных факторов внешней среды [106]. Основой для постановки данной задачи послужили результаты первичного анализа, которые систематизированы в таблице 3.1.

3.2 Разработка состава литого модифицированного бетона с отходом ферросплавного производства путем применения критериев профессора Окамуры

Центральной задачей проектирования состава литой бетонной смеси выступает подбор такого соотношения компонентов на 1 м³, при котором обеспечиваются не только заданные прочностные и гидрофизические свойства, но и стабильность эксплуатационных характеристик. В рамках текущего этапа исследований в качестве основы был принят метод подбора состава самоуплотняющегося бетона, предложенный профессором Хитоши Окамурой в соавторстве с Джорджем Озава, разработанный в 1990-х гг. в Токийском университете [107].

Ключевые особенности подхода заключаются в следующем:

– приоритетное использование мелкодисперсной фракции в больших количествах;

– применение заполнителя фракцией 5–20 мм;

– использование портландцемента с пониженной теплотой гидратации и повышенным содержанием белитовых фаз (C_2S);

– обеспечение содержания вовлеченного воздуха в диапазоне 4–7%.

Главный методологический сдвиг метода Окамуры по сравнению с традиционным подбором состава бетона заключается в том, что вместо водоцементного отношения (В/Ц), как базового показателя прочности, ключевым параметром становится водовяжущее отношение (В/ВЯ). Это обусловлено высокой чувствительностью реологических свойств СУБ к содержанию воды относительно всей дисперсной составляющей, включающей как цемент, так и активные минеральные добавки.

Для растворной части смеси при этом необходимо одновременно обеспечить и высокую вязкость, и достаточную подвижность, что достигается исключительно за счет использования гиперпластификаторов нового поколения, позволяющих сочетать малое содержание воды с высокой деформативностью [108].

Определение оптимального водовяжущего отношения (В/МДС)

Данный параметр определяется в ходе лабораторных испытаний, направленных на оценку расплыва конуса цементного теста при различных значениях В/МДС. Ключевым критерием служит значение «относительной»

площади расплыва, рассчитываемое как отношение конечной площади растекания теста к исходной.

Испытания проводятся в серии: исходное водовяжущее отношение принимается равным 0,85, при этом дозировка суперпластификатора остается постоянной. Цель – определить такую комбинацию воды, мелкодисперсной составляющей и суперпластификатора, при которой достигается целевой расплыв 245 мм, а время истечения через воронку В-фанелу укладывается в диапазон 9–11 секунд [107].

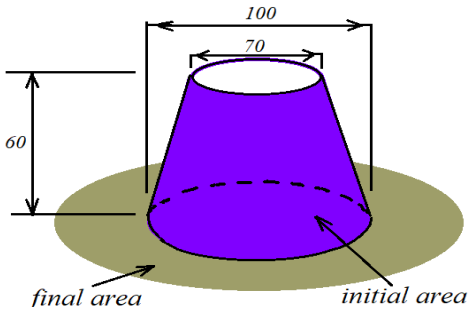


Рисунок 3.1 - Усеченный конус для определения расплыва цементного теста

На следующем этапе работы был выполнен детализированный расчет всех компонентов растворной части литого бетона, после чего осуществлены лабораторные испытания с целью экспериментального подтверждения соответствия полученных смесей заданным реологическим характеристикам. Особое внимание уделялось подбору минеральных добавок различной природы, что позволило расширить диапазон варьирования состава и повысить адаптивность смеси к эксплуатационным требованиям. Сводные результаты по основным реологическим параметрам модифицированных составов, полученных при использовании различных дозировок трех типов минеральных добавок, представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Влияние количества добавки микросилики МК-95 на реологию цементно-песчаной смеси

№	Основной состав*	Цемент, кг	Кол-во микрокремнезема от массы цемента, %	Кол-во микрокремнезема от массы цемента, кг	Количество суперпластификатора, кг	Расплыв(мм)	Время истечения, сек
1	Песок-900 кг, Вода-0,4 от цемента	600	0	0	6	265	7
2		570	5	30	6	261	8
3		540	10	60	6	253	9
4		510	15	90	6	245	10
5		480	20	120	6	237	12
6		420	30	180	6	231	14

*все данные приводятся из расчета количества компонентов на 1 $м^3$ бетонной или растворной смеси

На основании данных, представленных в таблице 3.2, установлено, что замещение 15% цемента микрокремнеземом обеспечивает наилучшие реологические показатели раствора. Именно при этом соотношении наблюдались оптимальные значения расплыва конуса и времени истечения через воронку, что соответствует требованиям к литым смесям. Исходя из этих характеристик, была сформирована серия образцов, приготовленных на основе выбранной растворной смеси. После отформовки они подверглись испытаниям на прочность при сжатии в сроки 1 и 28 суток, в соответствии с методикой, регламентированной [109].

Дополнительно был проанализирован параметр G/Glim, отражающий отношение фактического объема крупного заполнителя к его предельно возможному твердому объему. Полученные значения, представленные на рисунке 3.2, свидетельствуют о том, что в составе самоуплотняющихся бетонов степень заполнения крупным заполнителем стабильно поддерживалась на уровне порядка 50%, что способствует снижению внутреннего сопротивления смеси при деформации. Аналогично рассчитано и объемное соотношение мелкого заполнителя — S/Slim, которое составило около 60%, ограничивая подвижность раствора при сдвиге и обеспечивая необходимую устойчивость смеси в процессе формования и укладки.

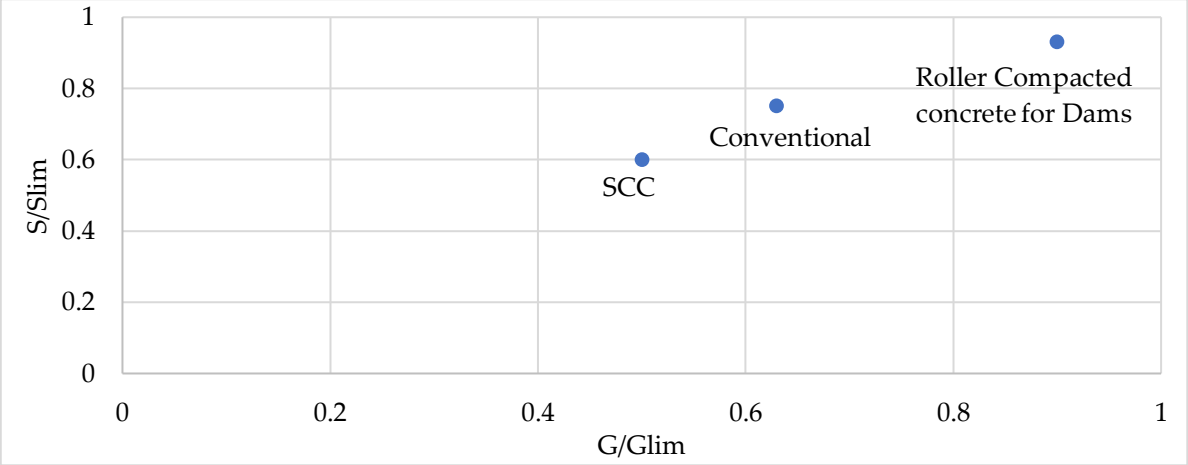


Рисунок 3.2 - Степень уплотнения заполнителя [107].

Первоначально расчетный объем крупного и мелкого заполнителя для заливки бетонной смеси определялся с использованием принципов, сформулированных профессором Окамурой. Только после проведения этих расчетов, в следующей части работы, было определено значение коэффициента G/glim, который характеризует относительное соотношение крупного агрегата и установлен равным 0,5. Это означает, что масса крупного заполнителя должна составлять половину от его насыпной плотности. Таким образом, при плотности 1400 кг/м³ в сухом уплотненном состоянии, расчётное количество крупного заполнителя составило:

$1400 \times 0{,}5 = 700$ кг.

Крупным заполнителем в данном случае считаются фракции свыше 4,75 мм. Аналогично, для мелкого заполнителя было принято соотношение S/Slim = 0,6, исходя из средней насыпной плотности песка 1500 кг/м³. Расчёт показал, что массовое содержание мелкого заполнителя в бетонной смеси должно составлять:

1500 × 0,6 = 900 кг.

Параллельно был установлен оптимальный водовяжущий коэффициент (В/МДС), полученный в результате серии экспериментальных замесов с учетом содержания суперпластифицирующей добавки в количестве 1,5 % от массы вяжущего вещества. Итоговое значение составило:

В/МДС = 0,32. (3.1)

Следующим шагом стало определение расчетного количества вяжущего. Поскольку в данном проектном расчете использование минеральной добавки (например, микросилики) не выведено отдельно, условно она была учтена как часть общего вяжущего компонента при дальнейших вычислениях.

$$\rho_{\text{уд}} = 3{,}15 \times 0{,}85 + 3{,}98 \times 0{,}12 = 3{,}249\ \text{г/см}^3 \qquad (3.2)$$

$$V_{\text{цем.теста}} = 1{,}000 - 0{,}298 - 0{,}2608 - 0{,}05 = 0{,}3912\ \text{м}^3 \qquad (3.3)$$

$$\frac{\text{В}}{1000} + \frac{\text{Вяж}}{3249} = 0{,}3912 \qquad (3.4)$$

При условии, что отношение воды к мелкодисперсной составляющей (В/МДС) принимается равным 0,32, а МДС приравнено к общему количеству вяжущего, расчетные значения компонентов приобретают следующий вид: объем воды составляет 192 литра на кубический метр бетонной смеси, а масса вяжущего вещества — 600 килограммов на тот же объем. Учитывая, что доля портландцемента в составе вяжущего составляет 85%, его расход определяется как 510 кг/м³, а доля микросилики составляет 90 кг/м³. Таким образом, расчетные параметры предварительного состава литого модифицированного бетона приведены в следующей таблице.

Таблица 3.3 - Состав ЛМБ по расчетным результатам

Наименование	Вяжущее	Щебень	Песок	МК-95	Вода	Хим.добавка
Расход, кг/м^3	510	700	900	90	192	6,58

Предложенный состав был испытан в лабораторных условиях. В ходе проведённых исследований были зафиксированы следующие результаты: значение расплыва конуса составило 713 мм, время истечения через воронку — 13 секунд, при этом уровень сегрегации смеси достиг 34%. В процессе формования выявлено водоотделение, сопровождающееся выраженной сегрегацией. Следует отметить, что полученный уровень сегрегации значительно превышает предельный норматив — 20%, установленный для данного типа бетона. Подобное отклонение, предположительно, связано с избыточным водоцементным соотношением и завышенной долей растворной

части в структуре смеси. Учитывая выявленные недостатки, было принято решение о необходимости последующей корректировки состава на экспериментальной основе. В соответствии с положениями, изложенными в “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete” (Европейском руководстве по самоуплотняющемуся бетону), классификация смесей данного типа по критерию удобоукладываемости предусматривает деление на три основных класса.

Таблица 3.4 - Классификация СУБ по показателю удобоукладваемости

Класс	Расплыв конуса, мм
SF 1	550-650
SF 2	660-750
SF 3	760-850

В результате проведённых испытаний установлено, что для обеспечения требуемого качества поверхности при использовании самоуплотняющегося бетона в массивных и армированных конструкциях, смесь по показателю удобоукладываемости должна соответствовать классу SF2. Оптимальным значением при этом является расплыв конуса в диапазоне 680–700 мм. Если данный показатель оказывается ниже установленного порога, могут наблюдаться следующие дефекты: образование сколов и раковин на поверхности, а также неравномерное распределение смеси внутри формы, затрудняющее её свободное течение. При расплыве в пределах 680–700 мм формуемые образцы демонстрируют ровную, бездефектную поверхность, а лицевая часть конструкций, выполненных с применением такой смеси, соответствует высокому классу отделки — А1. Вязкостные характеристики СУБ определяются временем истечения смеси через воронку V-формы в соответствии с установленными нормативами [110] (Annex B: Test methods). Согласно положениям “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete”, классификация самоуплотняющегося бетона по вязкости предусматривает деление на два класса.

Таблица 3.5- Классификация СУБ по показателю вязкости

Класс	Время протекания, с
VF 1	≤8
VF 2	9-25

В ходе экспериментальных испытаний установлено, что оптимальный интервал времени истечения бетонной смеси через V-образную воронку составляет от 7 до 12 секунд. Данный диапазон обеспечивает необходимую вязкость и способность смеси к самоуплотнению без нарушения ее однородности. Класс устойчивости бетонной смеси к расслаиванию (сегрегации) определялся в соответствии с требованиями нормативного документа [110]. В соответствии с положениями “The European Guidelines for

Self-Compacting Concrete", по степени склонности к сегрегации самоуплотняющийся бетон подразделяется на два класса.

Таблица 3.6- Классификация самоуплотняющихся бетонных смесей по показателю расслаиваемости

Класс	Расслаиваемость, %
SR 1	≤20
SR 2	≤15

После проведения серии лабораторных испытаний был получен состав литого модифицированного бетона (ЛМБ) класса В30 марки М450 со следующими характеристиками: расплыв конуса составил 680–700 мм, время истечения через V-образную воронку — 7–8 секунд, расслаиваемость — 16%. Далее в табличной форме представлен состав полученной смеси ЛМБ указанного класса и марки.

Таблица 3.7 - Состав ЛМБ класса В30 М450

Наименование	ПЦ	Щебень(5-15)	Песок	МК-95	Вода	Хим.добавка
Расход, кг/м^3	440	890	830	65	170	7,5

Далее приведены реологические характеристики, зафиксированные по итогам проведённых испытаний: класс по удобоукладываемости SF 2 — 690 мм, класс по вязкости VF 1 — 8 секунд, класс по расслаиваемости SR 1 — 19%. Следующим этапом исследовательской работы стала задача оптимизации рецептуры литого модифицированного бетона, содержащего комплексный модификатор (гиперпластификатор, полимер, микросилика). Для реализации данной задачи использован метод математического проектирования экспериментов, а в качестве средств расчета и визуализации использованы программные комплексы MATLAB r2022a и polyspace r2022a.

3.3 Разработка сбалансированной композиции трехфракционного вяжущего с управляемым гранулометрическим распределением через программу DropAndRoll

Проблема улучшения гранулометрического состава вязких систем, модифицированных минеральными компонентами, занимает центральное место в создании качественных и эффективных материалов на минеральной основе. С момента формирования теоретических основ структурообразования вязких соединений непрерывно проводятся исследования, направленные на выявление основных закономерностей, определяющих физико-химические свойства компонентов, их количественный состав и связь с конечными свойствами материала. Установление таких стандартов [27] позволяет контролируемо

изменять свойства вязкой системы путем регулирования состава и свойств используемого сырья.

В современных условиях специализированные программные средства играют решающую роль в достижении таких целей и обеспечивают оптимизационный анализ в области строительного материаловедения. Такие композиты позволяют получать аналитические зависимости, характеризующие, например, связь между гранулометрическим составом исходных компонентов и структурно-физическими параметрами проектируемой композиции. В рамках данного исследования были проведены расчеты геометрических и топологических свойств составов с целью получения смесей с рациональным распределением частиц, содержащих цементные порошки и минеральные компоненты с различной степенью дисперсности. Для выполнения данной задачи использовался разработанный в ТГТУ вычислительный модуль [31], где расчет плотности упаковки частиц исследуемой композитной системы осуществляется на основе классического уравнения, основанного на методическом подходе.

$$\bar{\varrho}_{\epsilon} = \mathrm{n}\frac{\mathrm{V_i}}{\mathrm{V_{box}}}, \qquad (3.5)$$

где V_i – объем частицы, n – число частиц, $\mathrm{V_{box}}$ – объём ячейки [111].

Предлагаемый метод направлен на расчет параметров моно- и полидисперсного гранулометрического состава порошковых материалов. В этом случае окончательное значение плотности рассчитывается по следующей формуле:

$$\bar{\varrho}_{\epsilon} = \sum \bar{\varrho}_{\epsilon\mathrm{i}}, \qquad (3.6)$$

где $\mathrm{V_{cell_i}}$ – объём ячейки, относящейся к i частице.

Первоначально она была предложена Иоганном Кеплером, а позднее Томасом С. Согласно математически обоснованному предсказанию Хейлза, максимальная теоретическая плотность, достигаемая путем плотной упаковки сфер конечного объема, ограничена значением 0,74. Однако в некоторых случаях, когда частицы помещаются в модельную ячейку без организации их положения, достигается лишь хаотическая упаковка, плотность которой, согласно эмпирическим наблюдениям, варьируется от 0,555 до 0,64 [111].

В настоящее время активно исследуются несколько сценариев формирования оболочек, включая моделирование в условиях отсутствия гравитации и переходных структур, возникающих при сжатии или вибрации. В таких случаях плотность укладки достигает значений примерно 0,58–0,61. Кроме того, будут расследованы случаи образования комков в результате соприкосновения контейнеров во время заполнения материалом. В этом случае значение плотности устанавливается в диапазоне от 0,61 до 0,64. Кроме того, в зависимости от требований к герметизации могут быть рассмотрены и другие типы покрытий [112].

Одним из основных топологических параметров, представляющих научный интерес в данной работе, является координационное число — величина, отражающая число частиц, находящихся в непосредственном контакте с выбранной центральной областью. В современной научной литературе рассматривается несколько подходов к определению этого параметра. В частности, различают число Ньютона, локальное координационное число, среднее координационное число и эффективное координационное число [111,112]. Например, число Ньютона — это точное число частиц относительно центральной сферы. При анализе влияния второго уровня корректировки используется концепция локальных корректировочных чисел. Это среднее координационное число, если рассматривать все близлежащие частицы в пределах определенного радиуса.

Несмотря на большой объем исследований, проводимых по данной теме, до сих пор не существует единого аналитического подхода, позволяющего с высокой точностью определить значение этого параметра. Это связано с тем, что, хотя физическое значение координационного числа на первый взгляд может показаться простым, его значение подвержено изменчивости и зависит от выбранного метода оценки и условий моделирования. Если рассмотреть теоретическую связь между двумя сферами радиусов R и R_2, расположенными в параллельном пространстве, то условие их соприкосновения можно выразить следующим уравнением.

$$d = r\,1 + r\,2, \qquad (3.7)$$

где d – расстояние между центрами двух сфер.

Очевидно, что в некоторых случаях между двумя частицами может сохраняться минимальный зазор, превышающий величину суммы их радиусов лишь на доли микрона ($d > r_1 + r_2$), при этом визуально или технически такие частицы могут ошибочно интерпретироваться как находящиеся в контакте. В экспериментальных условиях данная проблема носит особенно выраженный характер, поскольку точное фиксирование расстояний между микрочастицами сопряжено с высокой степенью измерительной погрешности, обусловленной как разрешающей способностью оборудования, так и особенностями подготовки образцов. В отличие от этого, при численном моделировании такие сложности исключены: координаты центров и геометрические параметры сфер задаются строго и воспроизводятся с максимальной точностью, что исключает неясности в интерпретации факта касания.

Также стоит подчеркнуть, что на результаты оценки плотности упаковки, равно как и на координационное число, заметное влияние оказывает так называемый эффект стенки [114]. Данный феномен проявляется в виде искажений плотности распределения частиц вблизи границ моделируемой области, что в реальных экспериментах приводит к неоднородности расположения частиц, а в численных моделях — к завышению или занижению характеристик упаковки в граничной зоне. Именно по этой причине часто

наблюдается расхождение между результатами натурных испытаний и данными, полученными на основе численных алгоритмов.

В рамках настоящей работы выполнены расчёты, направленные на определение плотности упаковки композиций, содержащих полидисперсные цементные порошки различной тонкости помола. В качестве исходной базы для анализа топологических характеристик использована следующая концепция:

$$\begin{cases} F_1^1 = 5\%, variation F_2^i = 0, 5, 10, 15 \dots 95\%; F_3^i = 95, 90, 85 \dots 0\% \; respectively \\ \dots \\ variations \; of \; F2 \; and \; F3 \; at \; fixed \; values \; of \; F1, multiples \; of \; 5\% \; increments \\ \dots \\ F_1^{20} = 95\%, variation F_2^i = 0 \; and \; 5\%; F_3^i = 5 \; and \; 0\% \; respectively \end{cases} \quad (3.8)$$

Концентрация каждой фракции в моделируемых композициях варьировалась на 5%. Во-первых, моделирование проводилось путем фиксации минимальной доли F1 на уровне 5% и варьирования массовых долей F2 и F3 в различных комбинациях. После завершения расчетов для этой пропорциональной группы константа F1 была увеличена до 10%, и все допустимые комбинации F2 и F3 были снова смоделированы последовательно, без изменения общих долей. Этот подход повторяли поэтапно, увеличивая содержание F1 на 15%, до 20% и до 95%, сохраняя при этом скорость изменения концентрации на уровне 5%.

В результате весь диапазон всех приемлемых комбинаций массовых долей F1, F2 и F3 оказался охвачен в пределах 100% от общей массы, что создало полную основу для полидисперсных композиционных вариаций. В качестве характеристического параметра для каждой фракции использовалось значение, соответствующее кумулятивному центру распределения, отражающее медианный (условно типичный) размер частиц этой фракции.

Таблица 3.8 – Характеристики дисперсности отдельных порошков цементного вяжущего (фракций)

Фракция	Удельная поверхность, $см^2/г$	Средний диаметр частиц, мкм
1	1500	13
2	3000	6,5
3	4500	4,8

Результаты численного моделирования процессов упаковки дисперсных порошков, полученные в ходе проведённого анализа, отражены на рисунке 3.3. В указанной диаграмме точка А обозначает оптимальное состояние структуры, при котором достигается наибольшая плотность укладки частиц при строго определённом соотношении фракций. Точка В, в свою очередь, отображает состав, оптимизированный с позиций технологической выполнимости — то есть минимизации трудоёмкости при производстве данного материала. На горизонтальной оси (X) отложено массовое содержание фракции F1, оси Y и Z представляют собой значения концентрации фракций F2 и F3 соответственно.

Учитывая чрезвычайно большое количество возможных сочетаний пропорций, полный объём расчётных данных невозможно включить в текст работы. В связи с этим, для иллюстрации закономерностей формирования упаковки, в таблице 3.9 приведены выборочные и наиболее репрезентативные результаты моделирования: граничные составы, в которых содержится только одна из фракций (100/0/0, 0/100/0, 0/0/100), а также ряд промежуточных комбинаций с шагом изменения в 20%. Эти данные позволяют наглядно проследить характер изменения плотности упаковки при переходе от мономодальной к полидисперсной системе.

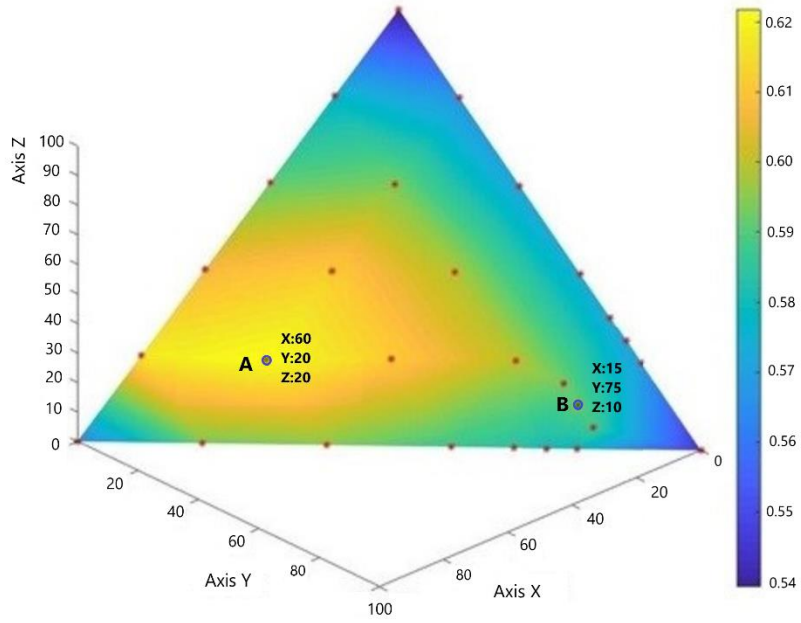


Рисунок 3.3 - Зависимость плотности упаковки от процентного состава смеси

Таблица 3.9 – Результаты моделирования пространственной упаковки

№	фракция 1, %	фракция 2, %	фракция 3, %	Плотность упаковки
1	0	0	100	0,568976
2	0	20	80	0,589987
3	0	40	60	0,581839
4	0	60	40	0,572967
5	0	80	20	0,570107
6	0	100	0	0,565223
12	20	0	80	0,587216
13	20	20	60	0,596141
14	20	40	40	0,599112
15	20	60	20	0,599704
16	20	80	0	0,576993
19	40	0	60	0,590324
20	40	20	40	0,611577
21	40	40	20	0,611634
22	40	60	0	0,595637
23	60	0	40	0,617781

24	60	20	20	0,620393
25	60	40	0	0,596144
26	80	0	20	0,615436
27	80	20	0	0,599853
28	100	0	0	0,555398

На основании проведённого моделирования установлено, что плотность упаковки частиц в исследуемых вариантах составов варьируется в пределах от 0,555398 до 0,620393. Минимальная плотность зафиксирована для монофракционного состава 100/0/0 (только F1), в то время как наибольшая плотность упаковки достигается при соотношении фракций 60/20/20 (F1/F2/F3). Учитывая, что производство высокодисперсной фракции F3 сопряжено с высокими энергетическими затратами, при выборе оптимального состава было принято ориентироваться на такой вариант, в котором содержание F3 минимально, а снижение плотности упаковки по сравнению с максимальной остаётся в допустимых пределах.

Анализ показал, что наиболее сбалансированным с точки зрения плотности и технологической целесообразности является состав 15/75/10, где содержится: 15% фракции с удельной поверхностью 1500 см²/г и средним диаметром частиц d_sp = 12 мкм; 75% — фракции 3000 см²/г с d_sp = 6,6 мкм; и 10% — фракции 4500 см²/г с d_sp = 4,9 мкм. Расчётная плотность упаковки такого состава составила 0,591131. Таким образом, расхождение между плотностью предлагаемого состава и теоретически максимальной составляет лишь около 5%, что подтверждает его эффективность с точки зрения компромисса между плотностью и затратами на измельчение.

В рамках последующего этапа работы был осуществлён отбор составов, характеризующихся высокой плотностью упаковки при условии содержания фракции F3 менее 15%. Для этих составов — а именно 15/80/5, 15/75/10 и 15/70/15 — были проведены экспериментальные испытания на прочность при сжатии. С целью более полного анализа также исследовались граничные однофракционные составы 100/0/0, 0/100/0 и 0/0/100, а также бинарные комбинации F1/F2 и F2/F3 в различных соотношениях, что позволило оценить характер изменения прочностных характеристик в зависимости от степени полидисперсности вяжущего компонента. Полученные данные прочности при сжатии представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Предварительная оценка прочности образцов вяжущего

№	Composition (components content), %			Compression strength, MPa	
				7 days	28 days
	F1	F2	F3		
1	Reference sample			29.78	41.18
2	100	0	0	20.17	29.81

3	0	100	0	30.58	42.02
4	0	0	100	39.14	51.00
5	20	80	0	30.03	41.97
6	25	75	0	28.73	40.75
7	30	70	0	27.31	38.78
8	0	80	20	36.06	48.16
9	0	75	25	37.41	50.03
10	0	70	30	38.09	51.60
11	15	80	5	38.32	51.94
12	15	75	10	39.14	52.61
13	15	70	15	39.90	53.26

На основании анализа полученных результатов установлено, что наивысшие значения прочности при сжатии были зафиксированы у образцов, содержащих три вида фракций в составе вяжущего компонента. Увеличение прочности по отношению к эталонному образцу (reference sample) достигало 25–29%, что свидетельствует о высокой эффективности трехкомпонентной структуры. В то же время двухкомпонентные составы, состоящие из фракций F1 и F2, демонстрировали изменчивость характеристик: от снижения прочности на 17% до её повышения на 25% относительно базового значения. Такая разница подтверждает значительное влияние распределения и взаимодействия фракций на структурные свойства цементного камня.

Отдельного внимания заслуживает тенденция повышения скорости набора прочности с увеличением доли высокодисперсной фракции. Так, на седьмые сутки твердения, прочность составов с различным содержанием F3 составляла от 67% (для состава 100/0/0) до 77% (для состава 0/0/100) от прочности, достигнутой к 28 суткам. Для reference sample этот показатель составил 72%, а у составов, включающих 15% F3, он варьировался в пределах 74–75%. Эта динамика подчёркивает влияние удельной поверхности частиц на скорость протекания гидратационных процессов.

Важным наблюдением является тот факт, что, несмотря на высокую удельную поверхность и потенциальную активность фракции F3, состав 0/0/100 показал меньшую прочность (51,0 МПа), чем трехкомпонентный состав 15/70/15 (51,9 МПа). Это подтверждает, что только высокая дисперсность не гарантирует лучших характеристик без учёта упаковки частиц и межфракционного взаимодействия. Уплотнение структуры и взаимное распределение фракций играют ключевую роль в формировании прочностных характеристик.

Для углублённого изучения влияния полифракционного цемента на физико-механические параметры были исключены граничные составы (№2–4), а также двухкомпонентные смеси, не обеспечившие положительного или стабильного эффекта (№5–7). Основной акцент в дальнейшем был сделан на следующие типы образцов:

– Type 1 – эталонныйсостав (Reference sample);

– Type 2 – 80% фракции 3000 см²/г и 20% фракции 4500 см²/г;

– Type 3 – 75% фракции 3000 см²/г и 25% фракции 4500 см²/г;

– Type 4 – 70% фракции 3000 см²/г и 30% фракции 4500 см²/г;

– Type 5 – 15% фракции 1500 см²/г, 80% фракции 3000 см²/г, 5% фракции 4500 см²/г;

– Type 6 – 15% фракции 1500 см²/г, 75% фракции 3000 см²/г, 10% фракции 4500 см²/г;

– Type 7 – 15% фракции 1500 см²/г, 70% фракции 3000 см²/г, 15% фракции 4500 см²/г.

Типы 2–4 классифицируются как двухкомпонентные смеси, а типы 5–7 — как трехкомпонентные, отличающиеся по количественному и качественному распределению дисперсных составляющих цементного вяжущего.

3.4 Оптимизация состава литого модифицированного бетона на основе ортогонального центрального плана второго порядка

Для анализа влияния контролируемых переменных на основные свойства бетона использовался метод экспериментального проектирования, основанный на квадратичной модели состава добавки [115]; В данном случае расчетные процедуры проводились на основе типовой формы уравнения, рассмотренной в выбранной Методике.

$$\bar{Y}_q = b_0 + \sum_{j=1}^{k} b_j x_j + \sum_{\substack{j,u=1 \\ j\neq 1}}^{k} b_{ji} x_j x_{ii} + \sum_{j,u=1}^{k} b_{ji} x_j^2 + \ldots, \qquad (3.9)$$

В рамках эксперимента был зафиксирован следующий состав исходных компонентов 1 м3 бетонной смеси: 170 литров воды, 890 килограммов гранитного щебня, 830 килограммов песчаного заполнителя и 7,5 килограммов поликарбоксилатной добавки «AR 122». Все приведенные значения использовались в качестве констант для каждой серии экспериментов. Конкретные факторы, показанные в таблице 3.11, были выбраны в качестве переменных, влияющих на прочность на сжатие (R), параметр интенсивности деформации (kc*) и водопоглощение (Wm) материала.

— x1 полимерной смеси «повидон К30» (Сд) по отношению к массе цементного вяжущего; - отношение объема полипропиленовой фибры (Сф) к общему объему бетонной смеси.

Таблица 3.11 – Интервалы и уровни варьирования входных факторов для планирования эксперимента второго порядка

№	Входные факторы			Основные уровни	Интервалы варьирования
	Наименование	Натуральный вид	Переменная		
1	Содержание полимера	$C_д$	x_1	0,2	0,1

2	Содержание полипропиленового волокна	$C_ф$	x_2	0,7	0,15

Полученные в ходе эксперимента данные обобщены в таблице 3.12. В рамках утвержденной Схемы испытаний было подготовлено по три контрольных образца для каждого варианта состава, а результаты испытаний зафиксированы для последующего анализа.

Таблица 3.12 – Результаты испытаний литого модифицированного бетона

№ п/п	$C_д$, %	$C_ф$, %	Факторы в кодированном значении		Результаты исследований		
			x_1	x_2	$R_{сж}$, МПа	K_c^*, МПа×м^{0,5}	W_m, % масс.
1	0,2	0,84	+1	+1	67,2	0,0681	2,5
2	0,15	0,84	-1	+1	60,1	0,0581	3,5
3	0,31	0,56	+1	-1	61,1	0,0635	3,1
4	0,12	0,56	-1	-1	62,6	0,0641	3,1
5	0,331	0,71	+1,414	0	65,8	0,0675	2,9
6	0,069	0,71	-1,414	0	60,6	0,0618	3,4
7	0,21	0,91	0	+1,414	67,1	0,0726	2,6
8	0,21	0,48	0	-1,414	63,2	0,0641	3,1
9	0,21	0,71	0	0	77,2	0,0751	1,8

Используя расчетные формулы по ортогональному центральному плану второго порядка, можно определить численные значения коэффициентов регрессионных моделей, результаты расчетов сведены в таблицу 3.13.

Таблица 3.13– Коэффициенты регрессионных уравнений второго порядка

Исследуемая характеристика		b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
Y_1	$R_{сж}$, МПа	77,5	1,628	1,116	2,141	-7,358	-6,433
Y_2	K_c^*, МПа×м^{0,5}	0,072	0,0021	0,0011	0,0029	-0,0018	-0,0024
Y_3	W_m, % масс.	1,8	-0,1966	-0,1224	-0,251	0,64	0,35

На основании обработанных экспериментальных данных построены уравнения регрессии (3.10; 3.11; 3.12), отражающие установленные зависимости.

$$Y_1 = 77,3 + 1,52x_1 + 1,23x_2 + 2,16x_1x_2 - 7,37x_1^2 - 6,54x_2^2 \quad (3.10)$$

$$Y_2 = 0,064 + 0,0021x_1 + 0,011x_2 + 0,0021x_1x_2 - 0,006x_1^2 - 0,004x_2^2 \quad (3.11)$$

$$Y_3 = 1,8 - 0,1x_1 - 0,11x_2 - 0,26x_1x_2 + 0,66x_1^2 + 0,46x_2^2 \quad (3.12)$$

С использованием вычислительных средств программного пакета MATLAB r2022a созданы графические представления поверхностей целевых

функций по уравнениям (3.10; 3.11; 3.12), а также определены оптимальные значения переменных xact и xsiya, при которых функции (Z) достигают своего экстремума. Полученные зависимости показаны на рисунках 3.4, 3.5 и 3.6 соответственно.

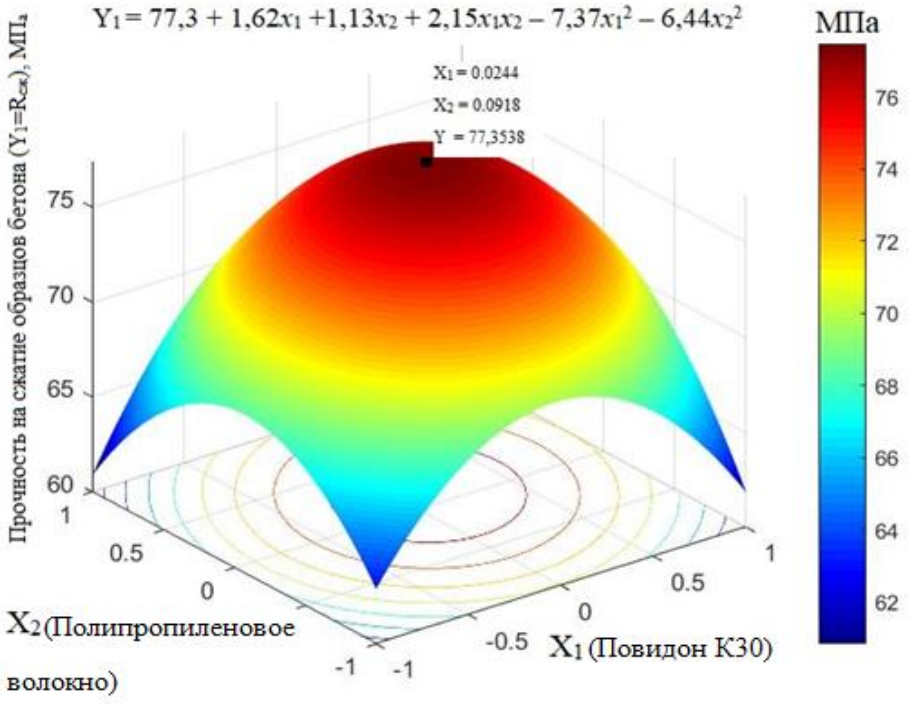


Рисунок 3.4 - представление поверхности второго порядка, описываемой уравнением регрессии (3.10)

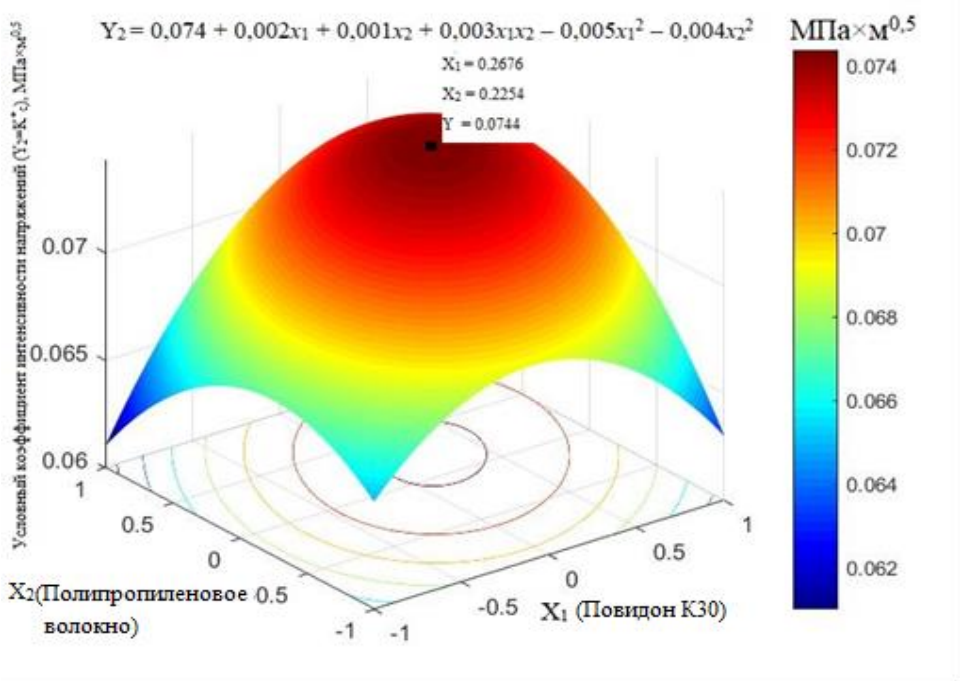


Рисунок 3.5 – Визуализация поверхности регрессионной зависимости второго порядка с уравнением (3.11)

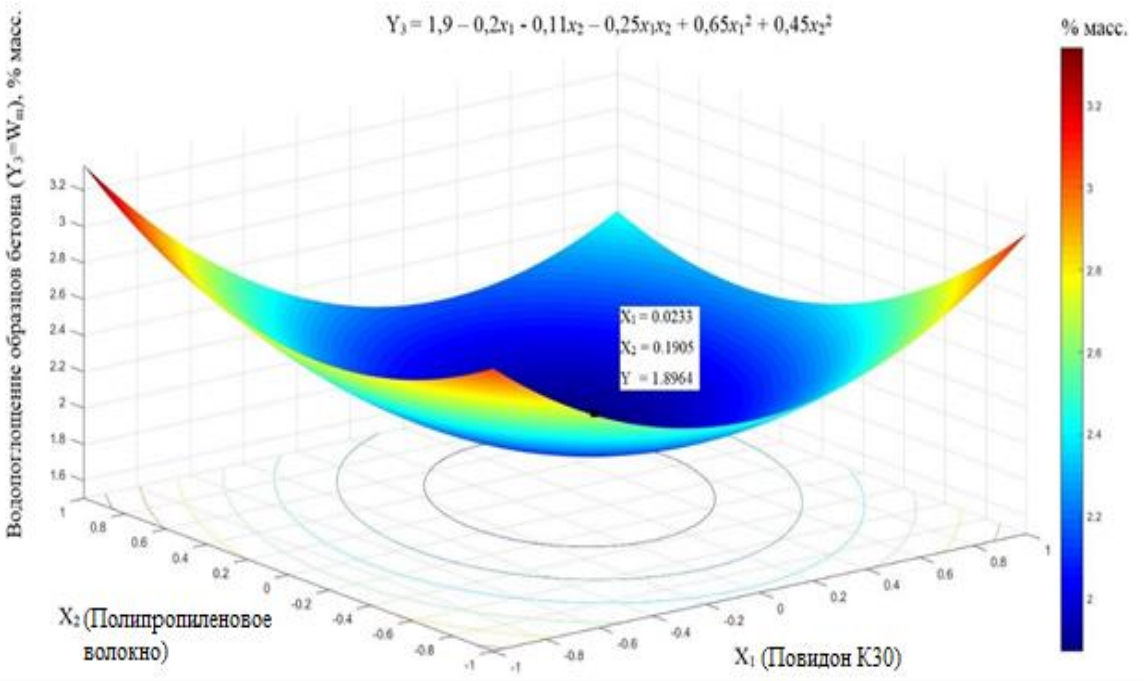


Рисунок 3.6 – визуализация поверхности второго порядка по регрессионной зависимости уравнения (3.12)

Допустимая погрешность аппроксимации построенных моделей составила от 1 до 2%. Экстремумы целевых функций, заданных регрессией второго порядка, были рассчитаны с использованием функциональности MATLAB r2022a. Для функции Yafl (прочность на сжатие) максимум зафиксирован на уровне 77,3468 при параметрах Xact = 0,0244 и x_2 = 0,0927, что дало 0,202% и 0,714% от естественных значений соответственно. Пороговое значение для функции YD (условный коэффициент интенсивности напряжений kc) составило 0,2254 при коэффициентах Xact = 0,0754 и xD = 0,266, что составляет 0,227% и 0,734% соответственно. Минимальный знак функции Y_3 (Wm водопоглощения) достигается при 2,251 при параметрах X_1 = 0,370 и X_2 = 0,120, т.е. при натуральных значениях 0,238% и 0,718%. При выполнении процедур оптимизации задаются оптимальные параметры для факторов: xnacopt = 0,2 и X isopt = 0,7, при которых прочность на сжатие достигает своего пика, а водопоглощение минимально. Подставляя эти значения в уравнения, для материала получаем следующие результаты: предел прочности при сжатии rsh = 77,5 МПа, условный коэффициент напряжения деформации kc = 0,075 МПа X min * V, водопоглощениеum = 1,9 %.

3.5 Выводы по главе III

1. На основе методологии рецептуры добавок для бетона, предложенной профессором Накамурой, была разработана первоначальная версия формулы

модифицированного монолитного бетона. В ходе лабораторных испытаний проведена экспериментальная корректировка параметров смеси для бетона марки М30, соответствующего классу прочности В450. В результате были также зафиксированы значения реологических свойств скорректированного состава.

2. В процессе предварительного анализа осуществлено моделирование распределения полифракционных систем, включающих три фракции различной степени дисперсности: F1 – средний диаметр частиц d_ср = 12 мкм, удельная поверхность S_ср = 1500 см²/г; F2 – d_ср = 6,6 мкм, S_ср = 3000 см²/г; F3 – d_ср = 4,9 мкм, S_ср = 4500 см²/г. Полученные результаты показали, что плотность упаковки частиц варьируется от 0,555398 до 0,620393. Минимальное значение упаковки зафиксировано для состава 100/0/0, максимальное – для состава 60/20/20. Оптимальным по совокупности технологических и физико-механических показателей признан состав №6, включающий 15 % фракции 1500 см²/г, 75 % фракции 3000 см²/г и 10 % фракции 4500 см²/г, при этом наблюдается устойчивая положительная корреляция между плотностью упаковки и прочностью бетона.

3. Уравнения регрессии второго порядка (3.10, 3.11, 3.12) достоверно показывают связь изменения прочности при сжатии, условного коэффициента интенсивности деформаций и водопоглощения литого модифицированного бетона с варьируемыми параметрами: массовым содержанием полимера повидона-К30 (хакт) и объемной концентрацией полипропиленового волокна (x_2).

4. При помощи математического инструментария Matlab R2022a определены экстремальные значения целевых функций регрессионных уравнений. Установлено:

MAX Y1 = 77,5 при x1 = 0,0235 и x2 = 0,0928 (в пересчёте – 0,202 % и 0,714 % соответственно);

MAX Y2 = 0,075 при x1 = 0,2667 и x2 = 0,2355 (в пересчёте – 0,227 % и 0,734 % соответственно);

MIN Y3 = 2,352 при x1 = 0,390 и x2 = 0,130 (в пересчёте – 0,238 % и 0,718 % соответственно).

5. Численным анализом определяются оптимальные значения переменных факторов: x1_opt = 0,2 и x2_opt = 0,7 в естественных координатах. Эти параметры позволяют одновременно достичь максимальной прочности на сжатие (Rсж) и снизить водопоглощение. Подставляя найденные значения, уравнения регрессии дали следующие свойства материала: rsh = 77,4 МПа, коэффициент условного напряжения деформации Kc * = 0,074 МПа $xM^{0.5}$, водопоглощение Wm = 1,9 %.

ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНОГО МОДИФИКАТОРА НА ПАРАМЕТРЫ ЛИТОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА

4.1 Анализ фазового состава и микроструктуры гидратационных продуктов трехфракционного цементного клинкера с использованием гиперпластификатора, полимера и аморфного диоксида кремния (микросилики)

Для исследования влияния композиционных модификаторов, включающих суперпластификатор Ar122, водорастворимый полимер Повидон К30 и микрокремнезем МК-95, на формирование микроструктуры цементного камня использовался метод рентгенофазового анализа, описанный ранее в Главе 2.

По данным литературы [116], использование аморфного кремнезема может повысить коррозионную стойкость цементного камня за счет притяжения активных соединений в ходе реакций гидратации и образования нерастворимых соединений. В данном исследовании было выбрано содержание вязкого микрокремнезема 15%, что согласуется как с фактическими наблюдениями, так и с результатами источников [42,116].

Расчетный анализ проводился на образцах, изготовленных с использованием модифицированных полидисперсных цементных вяжущих, выдерживаемых в течение 28 суток при стандартных режимах твердения. Окончательные данные рентгенофазового исследования сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 - Составы исследуемых образцов вяжущего в возрасте 28 суток нормального твердения, изготовленных из теста нормальной густоты

Материалы	Расход материалов для получения цементного теста нормальной густоты, г					
	1	2	3	4	5	6
ЦЕМ I 42,5 Н (завод.)	400	-	-	-	-	-
Полифракц. вяжущее ПВ (контр.) фр. $см^2/кг$: 1500 (15%) + 3000 (75%) + 4500 (10%) контр.	-	400	400	400	400	340
МК-95 (15%)	-	-	-	-	-	60
Гипс. камень (3%)	-	12	12	12	12	12
AR122 (1,7%)	-	-	1,2	-	1,2	1,2
Повидон-К30 (0,2%)	-	-	-	0,8	0,8	0,8
В/Ц	0,25	0,26	0,18	0,23	0,19	0,22
Сроки схват. цем.теста , ч-мин н/к	2-57 8-15	1-35 6-20	2-08 7-05	2-17 7-20	2-12 7-15	2-24 7-35
Rсж 3 сут, МПа	18,2	22,1	23,6	23,2	25,6	26,3
Rсж 28 сут, МПа	42,5	51,2	58,9	59,4	62,3	67,9

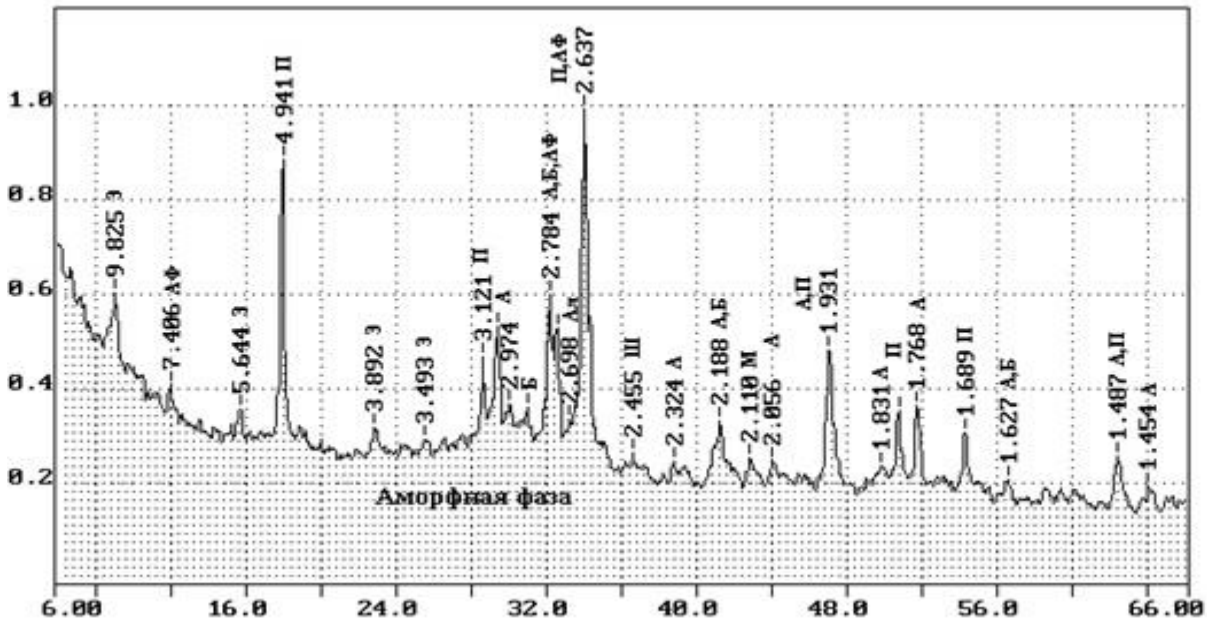
Анализ информации, представленной в таблице 4.1, показывает, что состав 2, содержащий вязкий материал с полифракционной структурой (ПВ), демонстрирует ряд важных преимуществ по сравнению с традиционными цементными составами (состав 1). В частности, соотношение цемента и воды (ц/м) было снижено на 16,6%, а также сокращены сроки начала и окончания строительства. Прочность на сжатие увеличилась на 26% в возрасте 3 дней и на 20% в возрасте 28 дней. Этот эффект обусловлен в основном наличием мелких фракций, способствующих раннему затвердеванию и формированию структуры цементного камня.

Включение в полифракционный состав суперпластификатора АР122 (состав 3), обладающего способностью существенно снижать водопотребность, позволило снизить Б/с на 18%. Кроме того, увеличилось время установки. Прочность на сжатие увеличилась на 6,8% и 13,8% через 3 и 28 дней соответственно по сравнению с немодифицированным ПВ (состав 2).

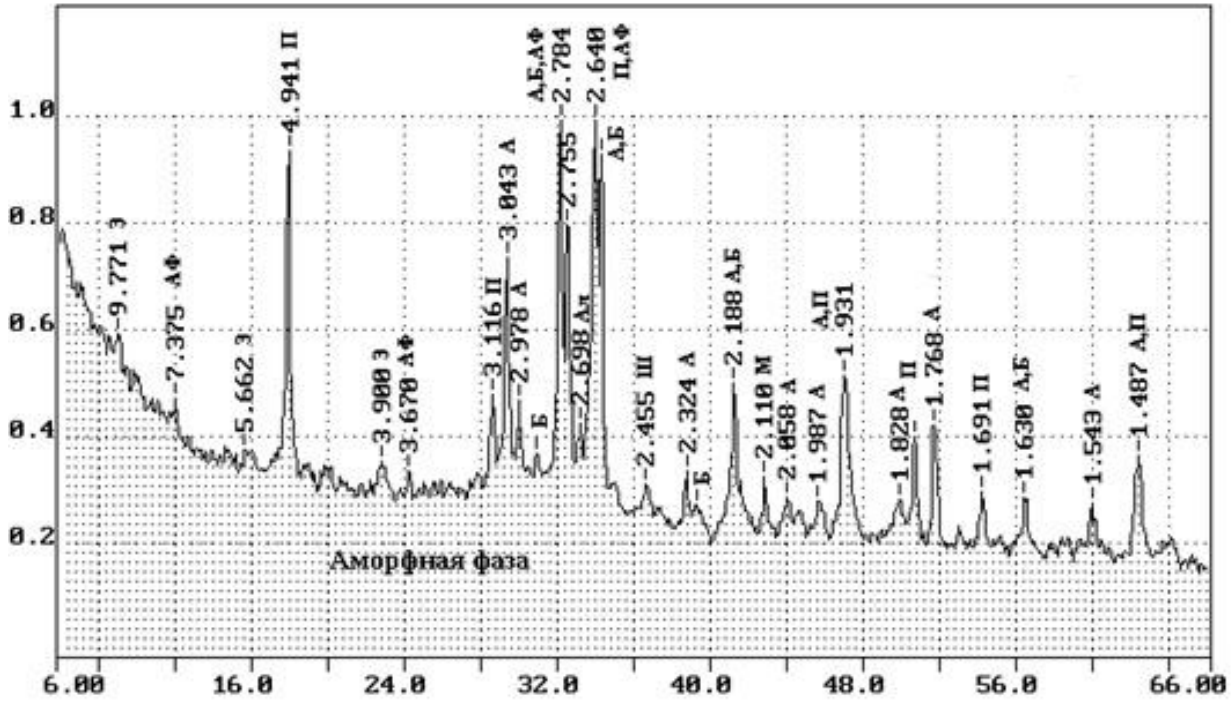
При наличии в составе ПВ только полимера повидона К30 (состав 4) зафиксированы небольшие отклонения всех параметров. Водоцементное отношение было увеличено с 0,19 до 0,22, а также увеличено время схватывания. В то же время прочность на сжатие несколько снизилась по сравнению со смесью 3: с 24,5 МПа до 24,1 МПа (3 дня) и с 59,8 МПа до 59,3 МПа (28 дней).

Совместное введение гиперпластификатора Ar122 и полимера Povidone K30 в многокомпонентную вязкую композицию (состав 5) дало синергетический эффект. По сравнению с базовым составом 2 показатель i/s снизился на 22,7% за 3 дня, а прочность на сжатие увеличилась на 11,2% и 25% соответственно за 28 дней.

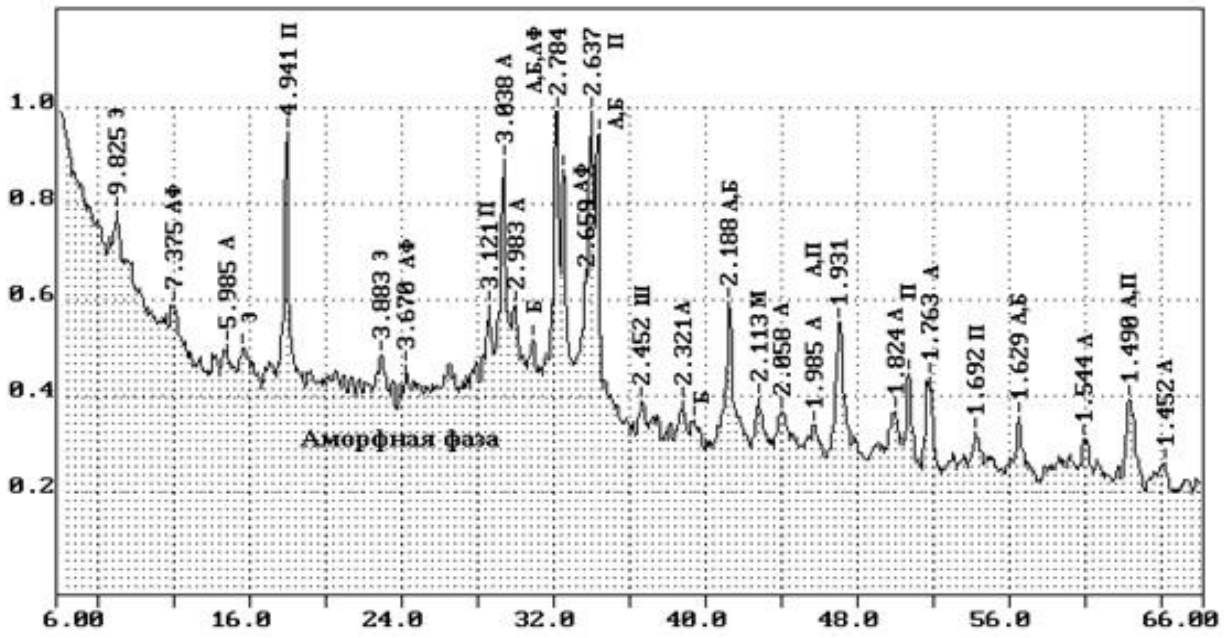
Наибольшая прочность на сжатие – 68,8 МПа – зафиксирована в варианте № 95, в котором дополнительно использовалась активная минеральная смесь микросиликата МК-6. Добавление этого компонента в связующую матрицу не только увеличило плотность структуры и увеличило прочность цементного камня, но и значительно улучшило его коррозионную стойкость. Результаты рентгенофазового исследования увлажненных образцов после 28 суток нормального твердения представлены на рисунке 4.1.



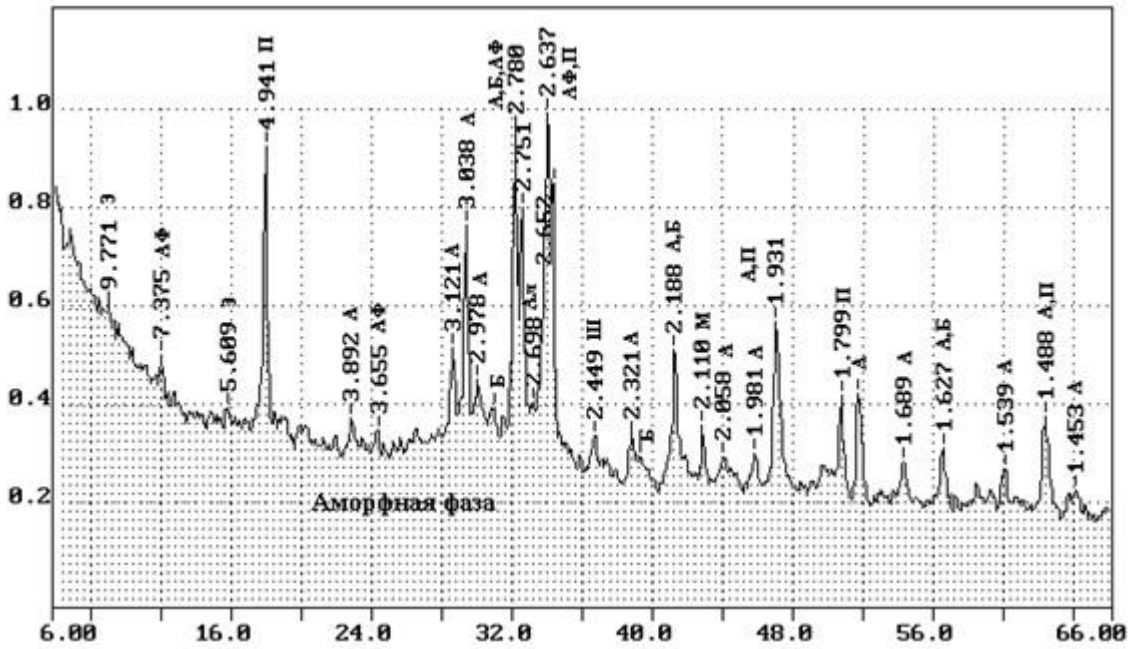
а) (состав 1) ЦЕМ I 42,5 Н+AR122;



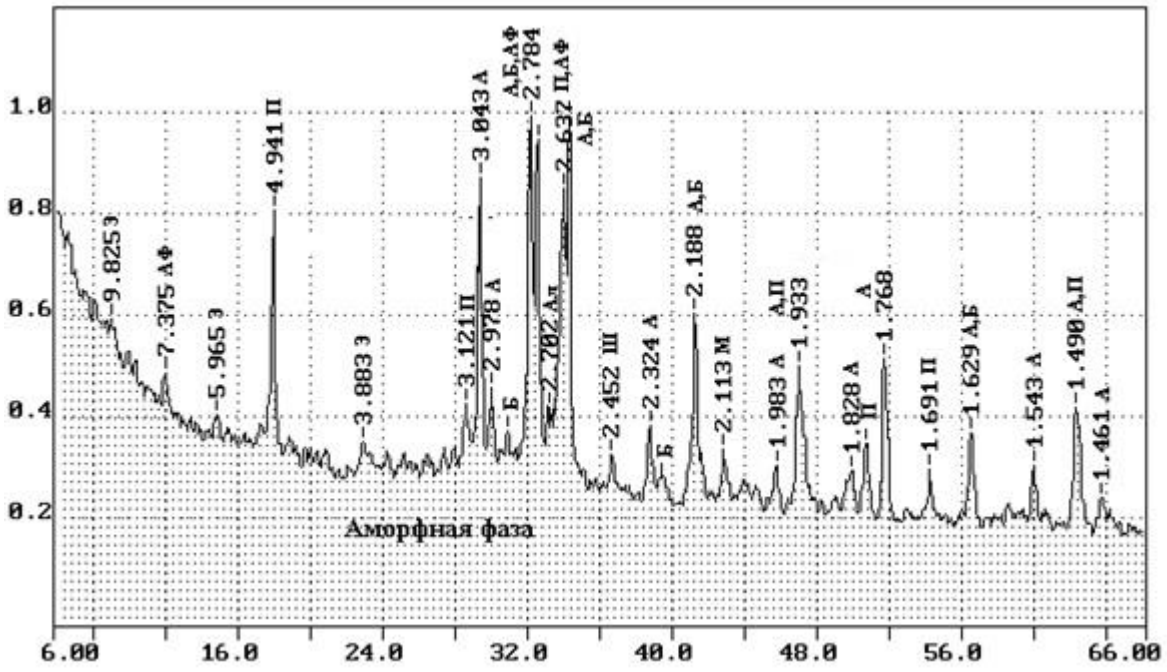
б)(состав 2) – ПВ +$CaSO_4 \cdot 2H_2O$;



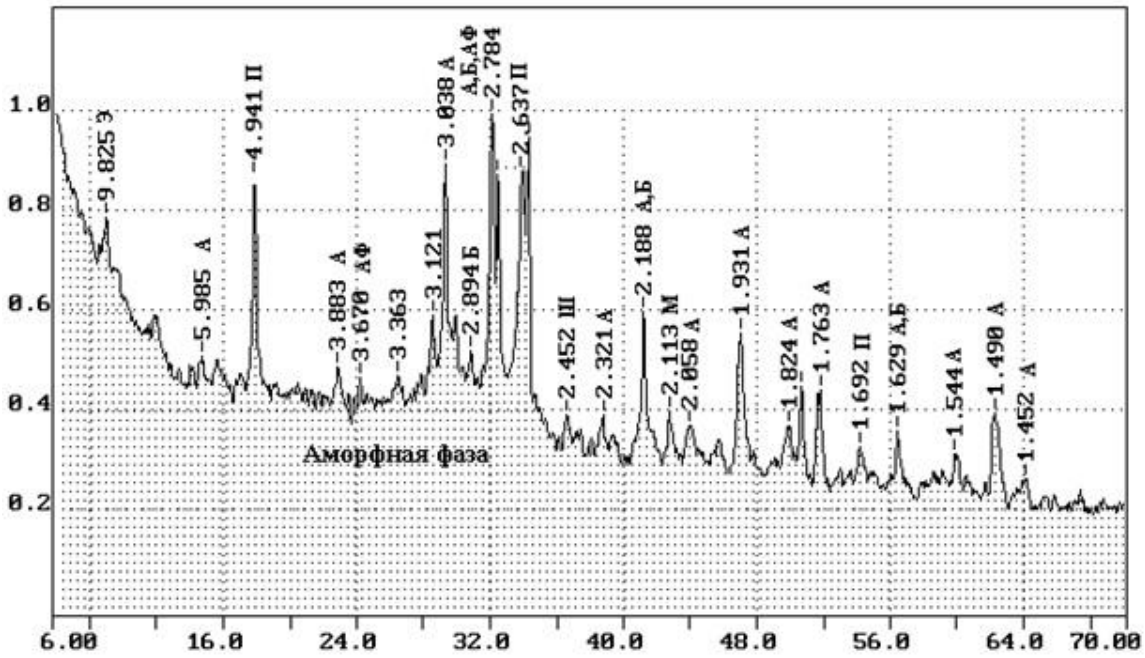
в) (состав 3) ПВ+$CaSO_4 \cdot 2H_2O$+AR122;



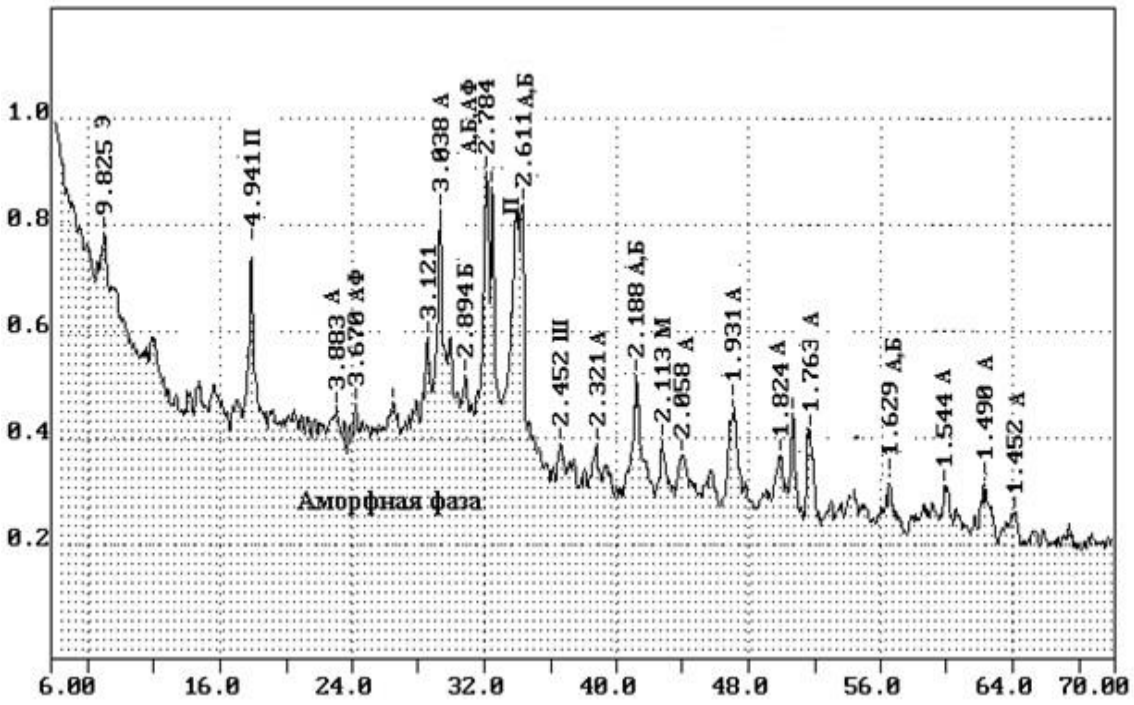
г) (состав 4) ПВ+ $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ + Повидон-К30;



д) (состав 5) ПВ + $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ + AR122 + Повидон-К30;



е) (состав 6) ПВ + $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ + AR122+ Повидон-К30+МК-95;



ж) ПВ + $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ + AR122+ Повидон-К30 +МК-95 (состав 6)через 6 месяцев нормального твердения

По данным рентгенофазового анализа (см. рис. 4.1) в таблице 4.2 представлена структура фазового состава цементного камня, образовавшегося в исследуемых образцах после 28 суток нормального твердения.

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

№	Цементный камень	Фазовый состав цементного камня,%				
		C_3SH	C_2SH	Эттрингит	Портландит $Ca(OH)_2$	Степень гидратации
1	ЦЕМ I 42,5 Н (гидратированный цем. камень) контрольный	24	20	2-3	20,5	70
2	ПВ с фракциями $см^2/г$: 1500 (15%)+ 3000 (75%) + 4500 (10%) +3% гипсовый камень	30	22	2	18,4	52
3	ПВ+ 1,7 % AR122	28	21	2	19,3	54
4	ПВ + 0,2 % Повидон-К30	27	22	до 2	18,5	51
5	ПВ + 1,7 % AR122 + 0,2 % Повидон-К30	26	20	до 2	17,2	57
6	ПВ + 1,7 % AR122 + 0,2 % Повидон–К30 + 15 % МК-95	25	21	1	13,5	62
7	ПВ + 1,7 % AR122	15	10	1	10,4	82

	+ 0,2 % Повидон–К30 + 15 % МК-95 через 6 месяцев					

Наибольшая степень смачивания, равная 57%, была продемонстрирована в примере № 6, где в качестве добавки был введен микрокремнезем марки МК-95 совместно с суперпластификатором АР122 и системой на основе полимера повидон-К30. Именно введение этой высокоактивной минеральной добавки, характеризующейся выраженной реакционной способностью пуццолана, обеспечивает быстрое образование гидратных фаз и существенное уплотнение микроструктуры цементного камня. Кроме того, усилилась связь между твердой матрицей и продуктами гидратации, что повысило прочность и коррозионную стойкость модифицированного материала при воздействии внешних агрессивных факторов.

Введение 15% аморфного диоксида кремния 6 (МК-95) для повышения стойкости к выщелачиванию оказало незначительное или вообще не оказало влияния на минералогию клинкера. Однако в портландцементе содержание Ca(OH)2 снизилось более чем на 26% по сравнению с составом 2. Это указывает на протекание пуццолановой реакции, в которой гидроксид кальция соединяется с диоксидом кремния, образуя нерастворимый низкоосновный гидросиликат кальция с высокой химической стабильностью.

Кроме того, доля аморфной фазы увеличилась в модифицированном цементном гипсе по сравнению с гидратированным контрольным цементом. Этот эффект обусловлен наличием аморфного SiO_2, способствующего образованию бесструктурных гидросиликатных соединений, которые в процессе затвердевания трансформируются в кристаллические формы тоберморита (тоберморит, ксонотлит, фосфагит, гиллбрандит и др.).

В системах Arita и Verita значительная доля нерастворимых компонентов образуется из-за плохой смачивающей способности частиц размером более 100 мкм. Их поверхности, покрытые плотной увлажняющей пленкой, препятствуют дальнейшему взаимодействию с водой и создают пассивную корку.

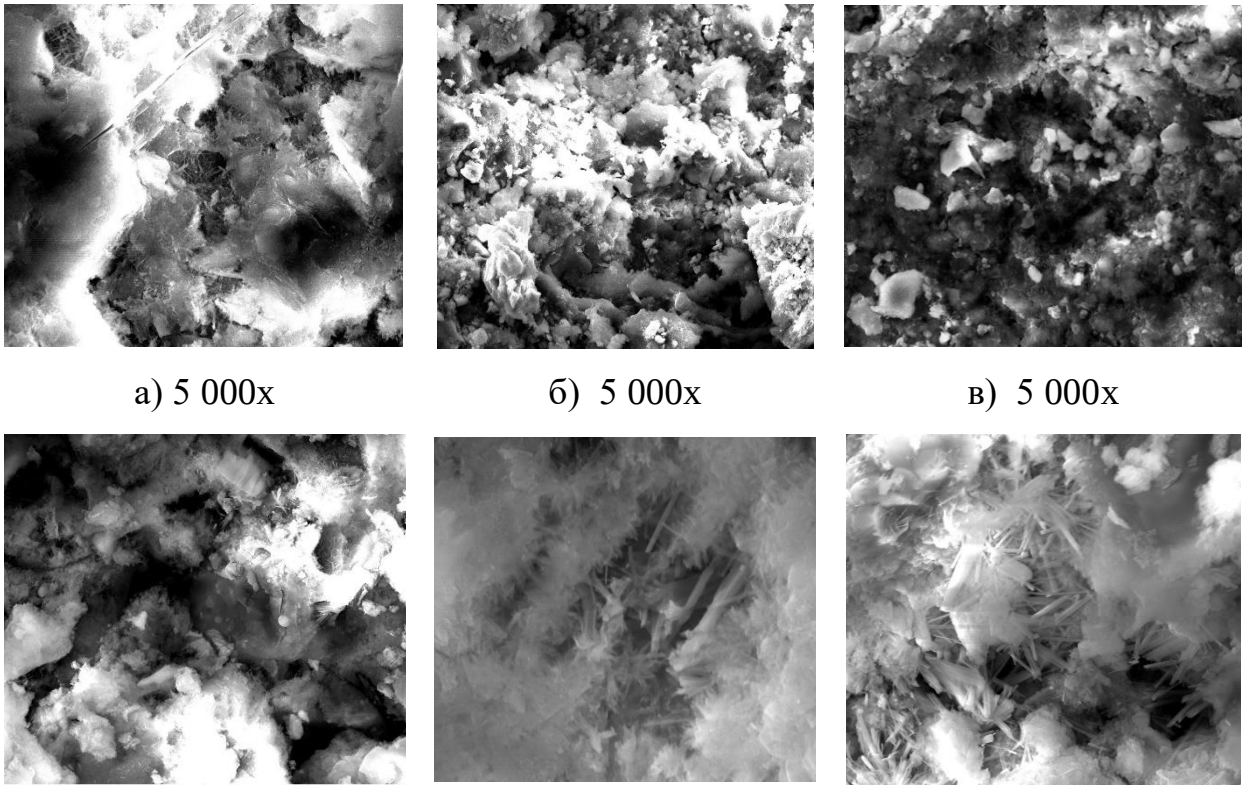
Для проверки гипотезы о запасах клинкера был проведен длительный эксперимент: состав № 6 был передан на длительное хранение, а № 7 был повторно проанализирован через шесть месяцев твердения. В заключение: содержание белых грибов снизилось на 10%, СМК на 11%, концентрация Ca(OH) снизилась до 10,4%, а уровень гидратации, наоборот, увеличился до 82%. Все это наглядно подтверждает: крупные дисперсные фракции цемента (удельная поверхность 1500 см2/г) становятся важным резервом прочности и долговечности цементного камня.

Далее перейдем к микроструктурной картине (рис. 4.2): данные сканирующей электронной микроскопии показывают, что использование комплексных модификаторов (суперпластификатор + полимер + микрокремнезем) приводит к образованию плотной цементной сетки.

Микропоры распределены равномерно, а в структуре отчетливо прослеживается развитие игольчатых кристаллов эттрингита.

Кроме того, при анализе состава № 5 отмечено, что использовался ПВ с 1,7% ар122 и 0,2% повидона-К30: кристаллы были измельчены в диапазоне 70-90 нм (см. рис. 4.2 б). Еще более глубокую дисперсность продемонстрировал состав № 6, в состав которого дополнительно входил микрокремнезем – размер кристаллитов уменьшился до 60-70 нм (рис. 4.2 в). Для сравнения, в немодифицированном бетоне № 2 (только ПВ) наблюдаются кристаллы размером около 100–120 НМ (рис. 4.2 а).

Таким образом, можно сделать обоснованный вывод: применение композиционных систем модификации существенно увеличивает дисперсность смачивающих продуктов, уплотняет структуру и создает условия для повышения эксплуатационных характеристик модифицированного литого бетона.



а) 5 000х б) 5 000х в) 5 000х

а) 30 000х б) 30 000х в) 30 000х

Рисунок 4.2 - Структурные особенности клея после стандартного 28-дневного отверждения:а) контрольный образец на основе полидисперсного цементного состава (ПВ);б) пример комплексного применения: в ПВ добавлено 1,7% гиперпластификатора AR122 + 0,2% полимера Pvidon-K30;в) Состав с ПВ, 1,7% АП 122, 0,2% повидона-К30 и дополнительно 15% микросиликата МК-95.

Результаты микроструктурного анализа показали, что наиболее плотная и однородная структура обнаружена в цементном камне № 6 с преобладанием

мелких пор диаметром от 0,1 до 0,5 мкм (рис. 4.2 в). Состав № 5 характеризуется преобладанием крупных пор — от 0,5 до 2 мкм (рис. 4.2 б). Контрольные испытания также показывают наличие пор размером от 0,5 до 2 мкм (см. рис. 4.2 а).

Выявленное улучшение структуры состава №6 объясняется совместным действием трех конверсионных компонентов (1,7% АР122 + 0,2% Повидон К30 + 15% МК-95), способствующих активному образованию низкоосновных гидросиликатов кальция. Подобные структурные изменения делают покрытие из цементного камня более плотным и устойчивым к внешним воздействиям.

Полученные экспериментальные данные согласуются с результатами ранее опубликованных исследований [117,118] и служат основой для дальнейшей разработки модифицированного литого бетона для использования в коррозионных средах со стандартизированными характеристиками.

4.2 Рассматриваемые составы литого модифицированного бетона с учетом дозировки и подбора исходных материалов

Задача повышения прочности и эксплуатационных свойств модифицированного монолитного бетона решена за счет уплотнения структуры цементного камня, достигаемого за счет использования трехуровневой многокомпонентной клинкерной составляющей, включающей в себя композиционный модификатор, включающий суперпластификатор АР122, полимер повидон К30 и микрокремнезем МК-95. Введение добавок реактивного аморфного кремнезема направлено на повышение коррозионной стойкости бетона. Для компенсации воздействия изгибающих нагрузок использовалось дисперсное армирование полипропиленовыми волокнами.

Конструктивные конфигурации модифицированного формованного бетона, сформированные по расчетной схеме, установленной в разделе 3.2, приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Исследуемые составы литого модифицированного 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	440	-	-	-	-	-
Полифракционное вяжущее	-	440	440	440	375	375
Микросилика МК-95 (15%)	-	-	-	-	65	65
Вода	170	170	280	170	170	170
Гранитный	890	890	890	890	890	890

щебень						
Песок	830	830	830	830	830	830
Гиперпластификатор «AR122» (1,7%)	7,5	7,5	-	7,5	7,5	7,5
Повидон-К30 (0,2%)	-	-	0,88	0,88	0,88	0,88
Полипропиленовое волокно (ПВ) (0,7%)	-	-	-	-	-	3,08
В/Т (Ц+МК)	0,39	0,39	0,63	0,39	0,39	0,39

После испытаний на прочность образцов-кубов 100 х 100 х 100 мм в условиях нормальной закалки в течение 28 суток был определен состав композиционной смеси, показавший наилучшие свойства. В его состав входит 1,7% гиперпластификатора АР 122, 0,2% полимерной добавки повидон-К30 и 15% микрокремнезема МК-95. Кроме того, согласно данным, приведенным в таблице 4.3, данный состав послужил основой для оценки физико-механических показателей, водостойкости и устойчивости к агрессивным воздействиям.

4.3 Технологические и реологические свойства смесей разработанных составов литого модифицированного бетона

На практике при производстве бетонных работ реологические свойства заливаемой бетонной смеси играют решающую роль. Самым важным из них является удобство использования. То есть способность смеси заполнять опалубку и образовывать плотный, однородный бетон без необходимости виброизоляции. Для количественной оценки этого параметра используются три критерия: непрозрачность конуса, вязкость и сопротивление отслаиванию.

В рамках серии экспериментов в качестве эталона рассматривалась смесь подвижности SF2, выбранная согласно расчетам (см. раздел 3.2), показывающая конусное распределение 690 мм. Параметры вязкости, определяемые по потоку, относятся к классу f1 (8 С), а сопротивление расслоению зафиксировано на уровне 19% SR1. Все реологические свойства исследованных литейных модифицированных композиций, а также значения их средней плотности приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Определение подвижности исследуемых смесей, водоотделения, растворотделения и средней плотности образцов

Маркировка	Исследуемый показатель			
	Удобоукладываемость марка/расплыв, см	Средняя плотность, кг/м^3	Вязкость, сек	Показатель расслаиваемости,%
Состав 1 контрольный (заводской) ПЦ+1,7%AR122	SF2/66	2377	17	27
Состав 2 ПВ+1,7%AR122	SF2/67	2395	13	23
Состав 3 ПВ +0,2% Повидон-К30	SF1/58	2401	22	20
Состав 4 ПВ + (1,7%AR122 + 0,2%Повидон-К30)	SF2/65	2404	12	19
Состав 5 ПВ + (1,7%AR122+ 0,2%Повидон-К30+15%МК-95)	SF2/70	2407	11	20
Состав 6 ПВ + (0,3%AR122+ 0,2%Повидон-К30+15%МК-95)+0,7%ПФ	SF2/69	2413	10	17

Анализ данных, представленных в таблице 4.4, показал, что добавление 0,7% полипропиленового волокна (1,7% AR122 + 0,2% Povidone K30 + 15% MK-95) в предлагаемую смесь 6 на основе полифракционного связующего и композитного модификатора PV+ значительно снизило вязкость смеси (7 с) и скорость расслоения по сравнению с контрольной смесью, приготовленной с использованием обычного цемента (10%). Этот результат имеет большое практическое значение, поскольку он помогает снизить вероятность возникновения дефектов при укладке литого бетона, таких как отколы, большая усадка заполнителя и структурная неоднородность по высоте.

4.4 Физико-механические характеристики разработанного литого модифицированного бетона

Опыт эксплуатации железобетонных и бетонных конструкций в условиях воздействия агрессивных сред, таких как кавитационная рефракция и

многократные циклы замораживания-оттаивания, показал, что их стойкость недостаточна. В некоторых случаях отдельные элементы могут преждевременно выйти из строя, что потребует ремонта и дополнительных затрат. При проектировании состава бетонной смеси важно учитывать характер внешних воздействий, условия эксплуатации и правильно подбирать сырьевые компоненты, которые обеспечат требуемую прочность бетона.

4.4.1 Предел прочности на сжатие

Показатель прочности на сжатие показывает способность бетона выдерживать механические нагрузки до момента разрушения. Это основополагающий параметр, характеризующий надежность бетонных конструкций, особенно в случае литого модифицированного бетона (ЛМБ), применяемого в ответственных конструкциях. Для испытаний на прочность для каждого исследуемого состава были изготовлены три кубических образца размером 100 × 100 × 100 мм. Исследование проводилось в 28-дневном возрасте после обычного кормления по методике [120]. Свойства разрушения и полученные значения прочности модифицированного литого бетона приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты испытаний прочности на сжатие литого модифицированного бетона

Маркировка	Номер образца	Плотность, кг/м^3	Прочность на сжатие, МПа	
			Rсж	Rсж,ср
Состав 1 контр ПЦ+ 1,7%AR122	1	2378	48,5	49,7
	2	2381	50,4	
	3	2380	50,1	
Состав 2 ПВ+1,7%AR122	1	2408	55,8	55,7
	2	2408	56,3	
	3	2409	54,9	
Состав 3 ПВ +0,2% Повидон-К30	1	2406	49,8	49,6
	2	2405	49,4	
	3	2406	49,6	
Состав 4 ПВ + 1,7%AR122 + 0,2%Повидон-К30	1	2412	57,5	57,4
	2	2410	57,0	
	3	2412	57,8	
Состав 5 ПВ + (1,7%AR122+ 0,2%Повидон-К30+15%МК-95)	1	2420	64,0	64,1
	2	2419	64,1	
	3	2420	64,2	
Состав 6	1	2418	67,1	67,1

ПВ + (1,7%AR122+ 0,2%Повидон-К30+15%МК-95)+0,7% ПФ	2	2416	66,9	
	3	2416	67,2	

Основные выводы, сделанные по результатам испытаний на прочность при сжатии, следующие:

- Прочность на сжатие состава 5, содержащего многокомпонентный модификатор вязкости и композитный модификатор (ПВ + 1,7% АР122 + 0,2% Повидон - К30 + 15% МК-95), оказалась на 29% выше, чем у контрольного состава 1 (на основе ПК + 1,7% АР122) и составила 14,4 МПа. По сравнению с составом 2 (ПВ + 1,7% АР122) прирост составил 15% или 8,4 МПа. Увеличение прочности напрямую связано с активизацией процессов гидратации частиц цемента и образованием многочисленных дополнительных зародышей кристаллизации, что ранее было подтверждено рентгеноконтрастными исследованиями и данными микроструктурного анализа, представленными в разделе 4.1.

- Установлено, что добавление 0,7% полипропиленовых микроволокон от веса связующего привело к увеличению прочности на сжатие на 5% по сравнению с составом с 4,7% без армирующих волокон.Кроме того, было установлено, что превышение идеального количества волокон приводит к их комкованию, что приводит к снижению прочностных свойств бетона. Имеющиеся данные [121] согласуются с этими выводами.

4.4.2 Предел прочности бетона на растяжение при изгибе

В рамках организованного исследования изгибной деформации модифицированных литых бетонных смесей были проведены испытания в соответствии со стандартами [87]. Образцы каждой исследуемой композиции, выполненные в виде призм размером 100x100x400 мм, готовятся по утвержденным методикам. Подробная процедура проведения испытаний, а также алгоритм обработки и интерпретации полученной информации описаны в пункте 2 главы 2.1.3 и подробно рассмотрены в разделе 4.3.

Рисунок 4.3 – 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	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	
			R_{tb}	R_{tb} (ср.)
Состав 1 контрольный ПЦ+ 1,7%AR122	1	9546,2	5,51	5,5
	2	9562,1	5,56	
	3	9539,4	5,43	
Состав 2 ПВ+1,7%AR122	1	9572,3	5,62	5,68
	2	9570,4	5,74	
	3	9575,1	5,68	
Состав 3 ПВ + 0,2% Повидон-К30	1	9589,3	5,57	5,57
	2	9587,4	5,61	
	3	9579,2	5,55	
Состав 4 ПВ + (1,7%AR122 + 0,2%Повидон-К30)	1	9591,4	6,22	6,23
	2	9593,2	6,23	
	3	9590,6	6,25	

Состав 5 ПВ + (1,7%AR122 +0,2%Повидон-К30 + 15%МК-95)	1	9606,7	6,62	6,61
	2	9608,2	6,60	
	3	9606,1	6,62	
Состав 6 ПВ +(1,7% AR122+ 0,2%Повидон-К30 + 15%МК-95) + 0,7%ПФ	1	9594,3	7,28	7,28
	2	9593,5	7,26	
	3	9594,1	7,29	

Анализируя результаты испытания на прочность при изгибе, наибольший прирост показателя RTB зафиксирован для образца конфигурации 6, который содержал композиционный модификатор (1,7% AR122 + 0,2% Povidone-K30 + 15% MK-95) и был армирован добавлением полипропиленовых волокон в количестве 0,7% от массы связующего. 1 Увеличение сопротивления по сравнению с контрольным составом составило 32,4%, что соответствует увеличению на 1,78 МПа. По сравнению с конфигурацией 5 (та же конфигурация, но без волокон) прочность увеличилась на 10,1% или 0,67 МПа.

Полученные результаты подтверждают эффективность армирования полипропиленовым волокном в повышении прочностных характеристик модифицированного литого бетона. Установленные закономерности [122,123] согласуются с результатами научных исследований, которые свидетельствуют о том, что добавление дисперсных волокон способствует формированию пространственно армированных цементно-каменных структур. Такая структура повышает устойчивость материала к образованию и распространению трещин за счет изменения характера деформации бетона, т. е. за счет увеличения доли псевдопластической деформации под нагрузкой. Эти эффекты подтверждают ранее полученные данные о влиянии армирования фиброй на светостойкость и механическую устойчивость бетонных композиций [122].

4.4.3 Трещиностойкость структуры литого модифицированного бетона

При эксплуатации бетонных конструкций в условиях воздействия внешних факторов основным параметром является их способность противостоять процессам трещинообразования. Поскольку в реальности существуют трещины различных масштабов — от макроскопических до микроскопических дефектов, необходимо использовать эффективные методы дисперсионного армирования, особенно полимерными волокнами.

Влияние фактора нагрузки, присутствующего в цементных композитах, приводит к возникновению и развитию разрушения, которое начинается с начальных микротрещин и далее развивается, достигая области разветвления. В этой области происходит рассеивание накопленной энергии разложения, сопровождающееся деградацией структуры материала.[124]

Систематическое накопление локальных повреждений на микроуровне снижает прочность и надежность бетона, что свидетельствует о важности введения армирующих компонентов. Согласно современной гипотезе о структурном связывании волокон трещин на разных масштабных уровнях, при разработке конфигураций ЛМБ следует учитывать принцип многослойного армирования, включая микро- и макроуровни.

При этом микродисперсные компоненты должны выступать в качестве армирующих элементов на микроуровне, а макродериновые волокна должны обеспечивать армирование на макроуровне [125,126]. Для анализа эффективности дисперсного армирования в бетонных составах использовали измельченные полипропиленовые волокна длиной до 12 мм.

Оценку прочностных характеристик исследуемых смесей при изгибе проводили в соответствии с положениями нормативного документа [88] для образцов-плит размерами 70x70x280 мм. Для каждого варианта композиции было создано четыре тестовых тела с сечениями глубиной 25 мм и шириной 2 мм. Перед основными испытаниями на каждом образце было проведено по два цикла нагрузки и разгрузки, каждый из которых имел по два цикла нагрузки и разгрузки. В результате усилие достигло 10% от расчетной разрушающей нагрузки.

Обобщенные свойства образцов, исследованных для определения вязкости разрушения, приведены в таблице 4.7. После завершения испытания была рассчитана характеристика светостойкости K_c^* на основе формулы (2.2), приведенной ранее в 2.1.4.

Для базового варианта смеси (образец №1)$F_c^* = 0{,}00283$ МН,$L_0 = 0{,}256$м, b=0,08м, t=0,08м, a_0=0,035м, $\lambda = 0{,}356142$ следовательно, уравнение (2.2) принимает вид:

$$K_c^* = \frac{3*0{,}002084*0{,}266}{2*0{,}07^{\frac{1}{2}}*0{,}07} * \sqrt{\frac{0{,}025}{0{,}07}} * (1{,}92 - 3{,}08 * 0{,}356153 + 14{,}43 * 0{,}347153^2 -$$

$$25{,}21 * 0{,}367153^3 + 25{,}9 * 0{,}347244^4) = 0{,}052538 \text{ МПа×м}^{0{,}5}$$

Аналогичным методом расчета определяется условный коэффициент интенсивности напряжений для всех остальных образцов, участвующих в исследовании.

Состав 2 (ПВ+1,7%AR122) – $F_c^* = 0{,}002392$ МН,$L_0 = 0{,}265$м, b=0,07м, t=0,08м, a_0=0,026м, $\lambda = 0{,}357245$ следовательно, уравнение (2.2) принимает вид:

$$K_c^* = \frac{3*0{,}002191*0{,}266}{2*0{,}07^{\frac{1}{2}}*0{,}07} * \sqrt{\frac{0{,}025}{0{,}07}} * (1{,}94 - 3{,}17 * 0{,}356142 + 14{,}45 * 0{,}357244^2 - 25{,}21 * 0{,}357244^3 + 25{,}7 * 0{,}357244^4) = 0{,}055491$$ МПа×м^{0,5}

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

Маркировка образца	Номер образца	Масса, г	Толщина в месте надреза, мм
Состав 1 Контрольный ПЦ+1,7%AR122	1	3337,1	45,0
	2	3340,2	45,0
	3	3341,7	45,0
	4	3346,3	45,0
Состав 2 ПВ+1,7%AR122	5	3347,2	45,0
	6	3344,7	45,0
	7	3350,1	45,0
	8	3343,3	45,0
Состав 3 ПВ + 0,2%Повидон-К30	9	3239,6	45,0
	10	3236,9	45,0
	11	3238,2	45,0
	12	3237,9	45,0
Состав 4 ПВ + (1,7%AR122 + 0,2%Повидон-К30)	13	3261,7	45,0
	14	3261,1	45,0
	15	3263,9	45,0
	16	3261,8	45,0
Состав 5 ПВ + (1,7%AR122 + 0,2%Повидон-К30 + 15%МК-95)	17	3265,8	45,0
	18	3267,5	45,0
	19	3265,3	45,0
	20	3265,8	45,0
Состав 6 ПВ +(1,7%AR122+ 0,2%Повидон-К30 +15% МК-95) + 0,7%ПФ	21	3261,9	45,0
	22	3263,8	45,0
	23	3262,6	45,0
	24	3263,1	45,0

Состав 3 (ПВ+0,2%Повидон-К30) – $F_c^* = 0{,}002103$ МН,$L_0 = 0{,}256$м, b=0,08м, t=0,08м, a_0=0,024м, $\lambda = 0{,}357244$ следовательно, уравнение (2.2) принимает вид:

$$K_c^* = \frac{3*0,002202*0,266}{2*0,07^{\frac{1}{2}}*0,07} * \sqrt{\frac{0,025}{0,07}} * (1,94 - 3,06 * 0,357244 + 14,52 * 0,357244^2 -$$

$$25,12 * 0,357244^3 + 25,9 * 0,357244^4) = 0,055723 \text{ МПа×м}^{0,5}$$

Состав 4 (ПВ+1,7%AR122+0,2%Повидон-К30) – $F_c^* = 0,002314$ МН,$L_0 = 0,256$м, b=0,08м, t=0,08м, a_0=0,026м, $\lambda = 0,357244$ следовательно, уравнение (2.2) принимает вид:

$$K_c^* = \frac{3*0,002323*0,266}{2*0,07^{\frac{1}{2}}*0,07} * \sqrt{\frac{0,025}{0,07}} * (1,94 - 3,06 * 0,357244 + 14,43 * 0,357244^2 -$$

$$25,21 * 0,357244^3 + 25,9 * 0,357244^4) = 0,05788 \text{ МПа×м}^{0,5}$$

Состав 5 (ПВ+1,7%AR122+Повидон-К30+МК-95) – $F_c^* = 0,002341$ МН,$L_0 = 0,256$м, b=0,08м, t=0,08м, a_0=0,026м, $\lambda = 0,357244$ следовательно, уравнение (2.2) принимает вид:

$$K_c^* = \frac{3*0,002431*0,266}{2*0,07^{\frac{1}{2}}*0,07} * \sqrt{\frac{0,025}{0,07}} * (1,94 - 3,06 * 0,357244 + 14,45 * 0,357244^2 -$$

$$25,21 * 0,357244^3 + 25,9 * 0,357244^4) = 0,062445 \text{ МПа×м}^{0,5}$$

Состав 6 (ПВ+1,7%AR122+0,2%Повидон-К30+15%МК-95+0,7%ПФ) – $F_c^* = 0,001944$ МН,$L_0 = 0,256$м, b=0,08м, t=0,08м, a_0=0,024м, $\lambda = 0,357244$ следовательно, уравнение (2.2) принимает вид:

$$K_c^* = \frac{3*0,002934*0,266}{2*0,07^{\frac{1}{2}}*0,07} * \sqrt{\frac{0,025}{0,07}} * (1,94 - 3,06 * 0,357244 + 14,54 * 0,357244^2 -$$

$$25,21 * 0,357244^3 + 25,9 * 0,357244^4) = 0,074269 \text{ МПа×м}^{0,5}$$

В таблице 4.8 приведены данные о максимальных значениях напряжений при изгибе, нагрузках, вызывающих разрушение призматических образцов, а также расчетные значения условного коэффициента интенсивности напряжений, полученные при испытаниях на светостойкость.

Таблица 4.8 – Характеристики трещиностойкости образцов при неравновесных испытаниях

Маркировка образца	Показатель		
	Нагрузка F_c^*, кН	Напряжение, МПа	Условный коэффициент интенсивности напряжений K_c^*, МПа×м^{0,5}
Состав 1 Контрольный ПЦ+1,7% AR122	2,084	5,972	0,052639

Состав 2 ПВ+1,7% AR122	2,191	6,294	0,055392
Состав 3 ПВ + 0,2%Повидон-К30	2,202	6,304	0,055622
Состав 4 ПВ + (1,7%AR122 + 0,2%Повидон-К30)	2,323	6,403	0,05887
Состав 5 ПВ + (1,7%AR122 + 0,2%Повидон-К30 +15% МК-95)	2,431	6,501	0,061456
Состав 6 ПВ + (1,7%AR122+ 0,2%Повидон-К30 + 15%МК-95) + 0,7%ПФ	2,934	8,065	0,074167

Результаты испытаний показали, что при введении в состав ЛКМ полипропиленового волокна (вариант 6) условный коэффициент концентрации напряжений увеличился на 40,91%, а изгибное напряжение увеличилось на 35,2% по сравнению с контрольной серией (вариант 1). Кроме того, в процессе испытаний было отмечено, что процесс первичного раскрытия трещин в образцах с фиброй происходил медленнее, чем в бетоне без замены. Результаты показывают, что наличие микроволокон снижает скорость распространения трещин, перераспределяет локальные напряжения и снижает концентрацию напряжений в областях возникновения макродефектов. Наблюдаемые данные подтверждаются результатами ранее опубликованных исследований [121,122,126], где наблюдалось увеличение адгезии между полимерными волокнами и цементно-песчаной матрицей, приводящее к повышению общей светостойкости бетонного композита.

4.5 Гидрофизические показатели литого модифицированного бетона

Разработка усовершенствованных формованных бетонов для эксплуатации в постоянном контакте с влагой требует формирования плотной матрицы с улучшенными гидрофизическими свойствами. К ним относятся водопоглощение, снижение капиллярного всасывания, улучшенная водостойкость, устойчивость к замерзанию-оттаиванию и коррозионная стойкость. Во многих источниках [76 127 128] подчеркивается, что использование модификаторов повышает гидрофобность бетона, особенно

когда в составе содержится дополнительно от 15% до 30% и более гидрофобных пластифицирующих компонентов. Для проверки этих данных мы провели стандартные испытания рецептуры ЛМБ, разработанной в соответствии с методологией, представленной в разделе 2. Результаты испытаний на водопоглощение и водостойкость приведены 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 ПЦ + 1,7% AR122	4,4	0,6	W6
Состав 2 ПВ + 1,7% AR122	2,9	0,8	W8
Состав 3 ПВ + 0,2% Повидон-К30	2,6	1,0	W10
Состав 4 ПВ + (1,7%AR122 + 0,2% Повидон-К30)	2,4	1,2	W10
Состав 5 ПВ + (1,7%AR122 + 0,2% Повидон-К30 + 15% МК-95)	2,2	1,4	W12
Состав 6 ПВ + (1,7% AR122+ 0,2% Повидон-К30 + 15%МК-95) + 0,7% ПФ	2,1	1,4	W12

Анализ результатов экспериментов позволяет утверждать: добавление комплексного модификатора и полипропиленовой фибры в литой модифицированный бетон (ЛМБ) существенно снижает уровень водопоглощения, обеспечивая плотную и стабильную структуру материала.Наибольшее снижение зафиксировано у состава 6 (ПВ + (1,7% AR122 + 0,2% Повидон-К30 + 15% МК-95) + 0,7% ПФ), где уровень водопоглощения оказался ниже на 52,3% по отношению к контрольному образцу (состав 1). Составы без фибры также показали значительное снижение: 34,1% — для состава 2 (ПВ + 1,7% AR122), 40,9% — для состава 3 (ПВ + 0,2% Повидон-К30), 45,5% — для состава 4 (ПВ + (1,7% AR122 + 0,2% Повидон-К30)), 50% — для состава 5 (ПВ + (1,7% AR122 + 0,2% Повидон-К30 + 15% МК-95)).

Относительно водостойкости можно отметить, что состав 5 показывает увеличение показателя на три ступени давления по сравнению с Контрольной смесью (ПК+1,7% ar122), что говорит о качественном скачке стойкости материала. При этом дальнейшее модифицирование за счёт добавления

полипропиленового волокна (состав 6) не дало дополнительного прироста водонепроницаемости, что указывает на незначительное влияние фибры на данный параметр.

На следующем этапе работы была исследована морозостойкость ЛМБ, являющаяся критически важной характеристикой при эксплуатации в климатических условиях с чередованием фаз замораживания и оттаивания. Установлено, что поровая структура бетона оказывает ключевое влияние на его морозостойкость: чем выше наличие открытых капилляров, тем ниже устойчивость материала к многократным циклам замерзания и оттаивания. При этом следует учитывать, что в микропорах порядка 10^{-5} см обычно находится связанная вода, неспособная к кристаллизации даже при температурах до -70 °С, вследствие чего именно макропористость и её морфология являются определяющим фактором снижения морозостойкости [129].

Испытания морозостойкости выполнялись в соответствии с базовой методикой, установленной нормативным документом [130], включающей циклическое воздействие замораживания при -18±2 °С и оттаивания при 20±2 °С, с предварительным насыщением образцов водой. В ходе испытаний возраст кубических образцов достигал 28 суток, а их геометрические параметры соответствовали размерам 100х100х100 ММ.Результаты испытаний на морозостойкость ЛМБ представлены в таблице 4.10 и рисунке 4.4.

Таблица 4.10 – Результаты испытания составов ЛМБ на морозостойкость

Маркировка образца	Потеря массы образца, %, после циклов						$К_{мрз}$ после циклов					
	200	300	350	400	500	600	200	300	350	400	500	600
Состав 1 контрольный ПЦ+1,7%AR122	1,19	2,17	-	-	-	-	0,95	0,92	-	-	-	-
Состав 2 ПВ+1,7%AR122	0,46	1,15	1,39	2,2	-	-	1,0	0,95	0,94	0,92	-	-
Состав 3 ПВ + 0,2% Повидон-К30	0,33	1,24	1,55	2,01	-	-	1,0	0,98	0,95	0,94	-	-
Состав 4 ПВ + 1,7%AR122 + 0,2%Повидон-К30	0,25	0,99	1,7	1,97	2,9	-	1,0	0,99	0,97	0,95	0,93	-
Состав 5 ПВ + 1,7%AR122 +0,2%Повидон-К30 +15% МК-95	0,13	0,19	1,27	1,51	1,71	1,82	1,0	1,0	0,99	0,95	0,93	0,91
Состав 6 ПВ+1,7%AR122+ 0,2%Повидон-К30 + 15%МК-95 + 0,7%ПФ	0,11	0,17	1,23	1,31	1,59	1,68	1,0	1,0	1,0	0,98	0,96	0,94

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

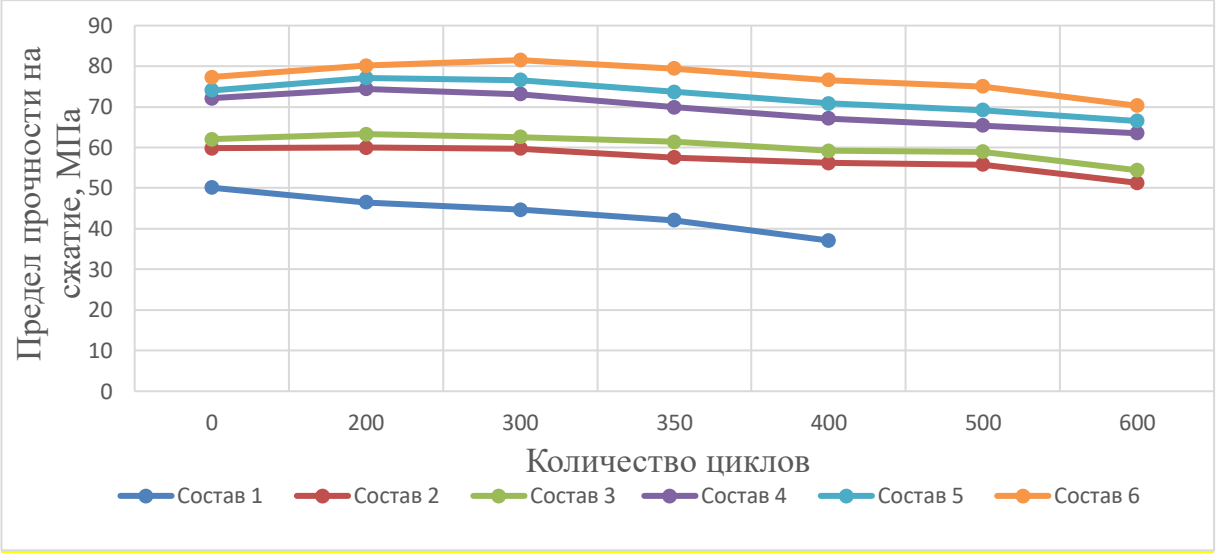


Рисунок 4.4 – Графическое изображение результатов испытаний образцов ЛМБ на морозостойкость:

1 – контрольный заводской ПЦ + 1,7%AR122;
2 – ПВ + 1,7%AR122;
3 – ПВ + 0,2% Повидон-К30;
4 – ПВ + (1,7%AR122 + 0,2%Повидон-К30);
5 – ПВ + (1,7%AR122 + 0,2%Повидон-К30 +15% МК-95);
6 – ПВ + (1,7%AR122 +0,2% Повидон-К30 + 15% МК-95) + 0,7%ПФ

Результаты испытаний на морозостойкость кубических образцов модифицированного формованного бетона (МФБ), полученных с различными составами, представленные в таблице 4.10 и на рисунке 4.4, показывают, что устойчивость материала к попеременным циклам замораживания и оттаивания в значительной степени зависит от применяемой смеси. Контроль 1 (ПК + 1,7% AR122) показал наибольшую потерю массы (более 2%) после 300 циклов, а прочность на сжатие снизилась более чем на 15%. Оба показателя превышают предельно допустимые значения, предусмотренные ГОСТ 10060-2012, согласно которому допустимая стоимость не должна превышать 2% по массе и 15% по прочности соответственно.

В отличие от контрольного состава образцы бетона, содержащие композиционный модификатор (ПВ + (1,7% АР122 + 0,2% Полидон-а + 15% МК-95)), показали существенно более высокую морозостойкость. В частности, составы 5 и 6 сохранили свою структурную целостность и показали потерю массы в диапазоне 1,8% и 1,7% соответственно после 600 циклов. Однако

прочность на сжатие снизилась на 10,1% и 9,3% соответственно, что указывает на запас прочности и стабильности даже при длительном воздействии погодных условий.

Обобщая результаты гидравлических исследований, можно сделать вывод, что наиболее стабильными свойствами обладает структура цементного камня, модифицированного полидисперсными вяжущими и комплексами примесей, содержащими полипропиленовые волокна. Композиция 6-ПВ + (1,7% АР122 + 0,2% Полидон-а + 15% МК — 95) + ПФ характеризуется очень плотной и однородной микропористой структурой с порами размером 0,1–0,5 мкм (см. 4.1). Это важный фактор, обеспечивающий морозостойкость и долговечность.

4.6 Коррозионная стойкость ЛМБ.

Срок службы бетонных и железобетонных конструкций в агрессивных средах напрямую зависит от степени устойчивости к химическим воздействиям. Чем прочнее материал, тем дольше его срок службы. Поэтому модифицированный литой бетон (ЛБ), предназначенный для использования в таких условиях, должен быть устойчивым к коррозии.

Растворы солей низкой концентрации считаются относительно неагрессивными при полном погружении в течение длительного времени, однако концентрация солей может локально увеличиваться из-за попеременного смачивания и высыхания или капиллярного насыщения пор материала и последующей кристаллизации структуры бетона. Присутствие в таких растворах ионов хлора особенно опасно, так как они разрушают стальную арматуру и, как следствие, ускоряют коррозию железобетона.

Анализируя условия возникновения коррозионных процессов и степень агрессивности среды для бетонных конструкций, становится ясно, что стойкость материала определяется не только интенсивностью контакта с коррозионной средой, но и составом активных химических веществ.

Основное внимание в работе уделено изучению воздействия жидких агрессивных факторов. Объектом исследования являются засоленные почвы степных регионов Казахстана, характеризующиеся высокой агрессивностью, уровнем pH выше 8,5, наличием гидрокарбонатов и карбонатов натрия (Nahcoernet и Na lancoernet). Для сравнения рассматриваются менее агрессивные подзолистые почвы лесных массивов с pH среды от 4,5 до 5,5. В рамках испытаний прочности литых модифицированных бетонов, приготовленных на полифракционных вяжущих, В.М. по Московской классификации были изучены три вида коррозионных повреждений [106]. Для моделирования условий эксплуатации использовались следующие растворы: 5% Naulysoox, 3% NaCl, очищенная вода и 0,01 м HCL, при этом образцы бетона выдерживались в течение шести месяцев. Испытания назначаются в соответствии с положениями нормативного документа [92]. Мониторинг

деградации проводился путем расчета потери массы (формула 2.4), снижения прочности на сжатие (формула 2.5) и снижения прочности на изгиб (формула 2.6). Все полученные значения сведены в таблицу 4.11.

Таблица 4.11 – Стойкость к агрессивным средам образцов ЛМБ 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 М	Na_2SO_4 р-р 5%
Состав 1 контрольный ПЦ+1,7% AR122	$\Delta m_{ср,}$ %	14	7	25,2	-8,4
	$\Delta R_{ср}$, %	25,1	12,5	55	-14
	$\Delta R_{tb}^{ср}$, %	25,7	13,3	62,4	-16,1
Состав 2 ПВ+1,7% +AR122	$\Delta m_{ср,}$ %	12,8	6,2	20,9	-9,8
	$\Delta R_{ср}$, %	23,1	11,1	44,7	-15,2
	$\Delta R_{tb}^{ср}$, %	24	12	52,2	-17,3
Состав 3 ПВ + 0,2% Повидон-К30	$\Delta m_{ср,}$ %	12,2	6,1	21,5	-10,1
	$\Delta R_{ср}$, %	22,2	10,9	45,3	-12,9
	$\Delta R_{tb}^{ср}$, %	23,8	11,8	52,5	-13,2
Состав 4 ПВ + (1,7%AR122 + 0,2%Повидон-К30)	$\Delta m_{ср,}$ %	12,1	6,3	20,6	-10,2
	$\Delta R_{ср}$, %	22,7	10,7	44,5	-11,1
	$\Delta R_{tb}^{ср}$, %	23,7	11,6	52,6	-16,4
Состав 5 ПВ + (1,7%AR122 + 0,2%Повидон-К30 +15% МК-95)	$\Delta m_{ср,}$ %	11,6	5,9	17,7	-10,6
	$\Delta R_{ср}$, %	17,9	7,2	43,3	-9,2
	$\Delta R_{tb}^{ср}$, %	19,6	10,5	45,6	-19,4
Состав 6 ПВ + (1,7%AR122+ 0,2%Повидон-К30 + 15%МК-95) + 0,7%ПФ	$\Delta m_{ср,}$ %	9,9	5,7	15,7	-11,1
	$\Delta R_{ср}$, %	15,5	6,2	39,8	-17,5
	$\Delta R_{tb}^{ср}$, %	18	6,7	41,4	-19,7

Стойкость литого модифицированного бетона (ЛМБ) к агрессивным средам, как показано в таблице 4.11, показывает явное преимущество состава, содержащего полифракционное связующее, 6% АР1, 7,0,2% повидона К30, 15% микрокремнезема МК-95 и 0,7% полипропиленовых волокон. При испытании в 3% растворе NaCl было отмечено: снижение потери массы на 29,3%, снижение прочности на сжатие на 38,8% и снижение прочности на изгиб на 30% по сравнению с базовым составом (конфигурация 1). При воздействии 0,01 М соляной кислоты (HCl) наблюдалось снижение потери массы на 27,7%, снижение прочности на сжатие на 27,4% и снижение прочности на изгиб на 23,7% по сравнению с контрольной серией. Аналогичным образом, испытания на промывку очищенной водой зафиксировали снижение массы на 18,6%, более чем двукратное снижение прочности на сжатие (50,4%) и примерно такое же снижение прочности на изгиб (49,6%). При испытании с 5% раствором сульфата натрия (Na_2soox) состав 6 показал противоположную динамику:

потеря массы снизилась на 24,3%, прочность при сжатии увеличилась на 20%, а прочность при изгибе увеличилась на 18,3% по сравнению с контрольным аналогом. Эти результаты подтверждают ранее выявленные зависимости, представленные в [132-134].

Таким образом, результаты подтвердили, что сочетание свободного Ca(OH)2 и микрокремнезема с выраженной пуццолановой активностью в щелочестойких полипропиленовых волокнах привело к лучшим показателям коррозионной стойкости, что является перспективным для использования в суровых условиях эксплуатации.

4.7 Выводы по главе IV

1. Анализ фазового состава, представленный в таблице 4.2, показал, что в отличие от использования стандартного цемента (состав 1-Cem I 42,5 ч) при переходе на полирефрактивный адгезив (состав 2) наблюдается увеличение доли клинических соединений. Это снижение напрямую связано с наличием в нем крупных, частично инертных фракций (1500 см2/г), которые выполняют роль резерва клинкерного материала. При замене полифракционного связующего на гиперпластификаторы АР122 (компонент 3) или Повидон-К30 (компонент 4) зафиксирована незначительная потеря метчиков и содержания с-с, не превышающая 1-2% относительно основного состава.2. При одновременном добавлении обоих компонентов (состав 5) наблюдалось аналогичное снижение доли клинкерных фаз, однако уровень гидратации увеличивался до 57%, что свидетельствует об усилении процессов гидратации. 15% микрокремнезема МК-95 -. (состав 6) при дальнейшем введении пуццолановая реакция активизировалась: количество портландита Ca(OH)2 уменьшилось более чем на 2% по сравнению с 26, а в структуре стали преобладать устойчивые низкоосновные гидросиликаты кальция. Перспективность концепции использования клинкерного сырья подтверждена результатами длительных испытаний: через 6 месяцев в 7-й партии содержание клинкера и сульфатов снизилось на 10% и 11% соответственно, количество Ca(oh) снизилось до 10,4%, а степень гидратации возросла до 82%. Таким образом, введение крупнозернистой фракции (Syд = 1500 см2/г) обеспечивает длительное развитие структуры цементного камня и способствует формированию высокопрочного бетона.

2. Электронная микроскопия цементного камня выявила радикальные изменения в его структуре. Влияние гиперпластификатора, полимеров и микрокремнезема привело к образованию прочной и однородной пористой матрицы, в которой особенно заметно скопление игольчатых кристаллов эттрингита. Размер этих кристаллов значительно уменьшился, достигнув 60-70 нм. Структура цементного камня в настоящее время характеризуется массивной мелкопористой сеткой с размерами пор от 0,1 до 0,5 мкм, что в свою очередь

свидетельствует о развитии высокой плотности материала и потенциальной устойчивости к агрессивным внешним воздействиям.

3. Сравнительные испытания контрольной цементной системы и модифицированной рецептуры № 6 выявили явные реологические преимущества. Уменьшение времени завершения на 7 секунд наблюдалось при введении полирефрактивного клея, содержащего пакет добавок (ar122 – 1,7%, повидон-К30 – 0,2%, МК-95 – 15%) и полипропиленовое волокно (0,7%).когда индекс складывания уменьшается на 10%. Можно отметить, что наблюдаемые изменения параметров напрямую влияют на эксплуатационные характеристики композита: благодаря модифицирующим добавкам удается снизить фракционное расслоение, подавить процессы крупнозернистого заполнения, выровнять морфологию бетонного массива в вертикальных сечениях.

4. Установлено, что механические параметры цементных систем при сжатии и изгибе четко связаны с использованием модифицирующих компонентов. Аналитический обзор позволяет составить отчет:

- Состав 5 (ПВ + ар122 1,7% + повидон-К30 0,2% + МК-95 15%) превысил контрольный образец 1 (ПК + ар122 1,7%) на 14,4 МПа (+29%), а вариант 2 (ПВ + ар122 1,7%) на 8,4 МПа (+15%), что подтверждает синергетический эффект комплексной модификации;

- Добавление 60,7% полипропиленовых армирующих волокон обеспечило увеличение прочности на сжатие с 4,7% до 5%, однако экспериментальные данные показывают, что превышение критического предела концентрации волокон приводит к тенденции к слипанию структурных элементов с последующим снижением механических свойств;

- Результаты испытаний выявили лидером по прочности на изгиб состав 6 (+модификатор ir) – пороговые значения r_tb превысили контроль на 1,78 МПа (+32,4%), а образец 5 – на 0,67 МПа (+10,1%), что косвенно указывает на роль волокон в перераспределении напряжений при деформации.

5. Кардинально переосмыслены закономерности разрушения и параметры образования трещин в призмах из ЛКМ. Ключевое наблюдение: образцы, армированные волокном (версия 6), демонстрируют нелинейный сценарий разрушения — начальная зона трещины постепенно расширяется с увеличением напряжения на 35,2% во время изгиба по сравнению с контролем. В модифицированных системах показатель концентрации напряжений увеличился на 40,91%, что может быть связано с рассеиванием энергии через их мостики. Интересно, что кинетика растрескивания в полипропиленовых композициях имела квазипластические свойства: вместо катастрофического распада наблюдалось многостадийное «набухание» дефектов. Это явление косвенно подтверждает гипотезу о гашении микродеформаций — армирующие элементы способны поглощать часть разрушающих нагрузок, переводя хрупкое сколы в контролируемый процесс деградации. Стоит отметить парадокс: несмотря на улучшение светостойкости, избыток волокон (более 0,7%)

вызывает эффект обратной связи — накопление волокон создает новые концентрации напряжений.

6. Проведёнными испытаниями подтверждено улучшение гидрофизических характеристик модифицированных составов. В частности, состав 6 (ПВ + 1,7% AR122 + 0,2% Повидон-К30 + 15% МК-95 + 0,7% ПФ) продемонстрировал снижение водопоглощения на 52,3% по сравнению с контрольным образцом (состав 1). Аналогичные показатели для других исследуемых составов составили: 34,1% (состав 2), 40,9% (состав 3), 45,5% (состав 4), 50% (состав 5).

Криоустойчивость бетонных систем выявила необычные закономерности при испытании модифицированных образцов. Составы 5-6 с полифункциональными добавками показали рекордную вязкость разрушения: после повышения температуры на 600°C потеря массы не превысила 1,7-1,8%, а регресс прочности сохранился на уровне 9,3-10,1%. Наблюдаемое явление позволяет выдвинуть тезис о синергетическом эффекте: сочетание химических пластификаторов и армирования волокнами способно препятствовать капиллярной миграции влаги за счет изменения структуры порового пространства. Интересно отметить парадокс – несмотря на однородность показателей, состав 6 с волокнами показывает несколько меньшую деградацию прочности (9,3% против 10,1%), что можно объяснить тем, что микрофракция действует как сетка распределения напряжений в областях ледяных линз.

7. Экспериментальные испытания коррозионной стойкости систем ЛМБ выявили аномальную стойкость модифицированных образцов. Можно сказать, что состав 6 (ПВ + [ar122 1,7% + повидон-К30 0,2% + Мк-95 15%] + ПФ 0,7%) проявляет максимальную инертность по отношению к химической агрессии:

Скорость распада массы в хлоридной среде (3% NaCl) снизилась на 29,3%, а регрессия прочности на сжатие/изгиб составила 38,8% и 30% соответственно по сравнению с контрольной группой;

Кислотное воздействие (0,01 м HCl) привело к снижению показателей - масса уменьшилась на 27,7%, прочность на сжатие на 27,4%, прочность на изгиб на 23,7%;

Испытания очищенной воды, имитирующей вымывание, выявили аномальные тенденции: потеря массы при катастрофическом снижении мощности снизилась на 18,6% до 50,4% (сжатие) и на 49,6% (изгиб) по сравнению с контрольным фоном;

Воздействие сульфата (5% Navsoox) вызвало противоположные изменения – динамика роста массы замедлилась на 24,3%, прочность на сжатие увеличилась на 20%, прочность на изгиб увеличилась на 18,3% и показала обратную зависимость. Парадоксальный эффект может быть обусловлен образованием защитных фаз в матрице вследствие воздействия сульфата.

ГЛАВА V НАУЧНО - ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ РАБОТЫ ПО ВНЕДРЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОГО ЛИТОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА

5.1 Технологическая эффективность литого модифицированного бетона на основе полифракционного вяжущего с отходом ферросплавного производства

Долговременная устойчивость инновационной бетонной матрицы к экстремальным условиям эксплуатации переосмысливает классические представления о коррозионной стойкости. Технологический прогресс достигнут за счет гибридной модификации цементной матрицы, где пакет добавок (АП122 — 1,7%; повидон-К30 — 0,2%; микрокремнезем — 15%) сочетается с 0,7% полипропиленового волокна, образуя трехмерный армирующий каркас. Основные эксплуатационные параметры, включая аномально низкую динамику деградации под воздействием химических и климатических факторов, представлены в матрице сводных данных (таблица 5.1). Композиция испытывалась методом трехкратного сравнения: с эталонными ЛКМ, промышленными аналогами и жесткими нормами ГОСТ 32955-2014, где критическим параметром являлась не абсолютная прочность, а коэффициент сохранения свойств при циклических нагрузках. Интересно, что использование отходов ферросплавов не только повысило экономическую целесообразность, но и нелинейно увеличило диффузионный барьер материала — эффект, не учтенный в первоначальной гипотезе исследования.

Таблица 5.1 – Эксплуатационные свойства литого модифицированного бетона на основе полифракционного вяжущего с диоксидом кремния

Показатели смеси и бетона	Контрольный ПЦ+1,7%AR122	ПВ + 1,7%AR122+ 0,2% Повидон-К30 +15%МК-95+0,7%ПФ	ГОСТ 32955-2014 Лотки дорожные водоотводные. Технические условия
Удобоукладываемость Марка/ОК см	SF 2 – 690мм	SF 2 – 690мм	-
Средняя плотность смеси, кг/м^3	2380	2417	2200-2500
Предел прочности на сжатие, МПа/Класс бетона	49,7/В35	67,1/В50	В30
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	5,5/ B_{tb} 4	7,28/ B_{tb} 5,2	B_{tb} 4
Условный коэффициент интенсивности	0,052639	0,074167	-

напряжений, МПа×м^{0,5}			
Водопоглощение, % масс.	4,4	2,1	5
Марка бетона по водонепроницаемости	W6	W12	W6
Марка бетона по морозостойкости, F_1	300	600	200

Табличные данные выявили принципиальное превосходство инновационной бетонной матрицы над референтными системами. Каскадная модификация на основе полифракционного связующего, сочетающего остатки ферросплавов, полимерную матрицу (ar122 — 1,7%, повидон-К30 — 0,2%) и 0,7% полипропиленового волокна, позволила перезагрузить профиль эксплуатационных характеристик материала. Синергию компонентов можно назвать катализатором повышения качества: микросилика (15%) образует плотную матрицу, волокна препятствуют образованию трещин, а полимерный комплекс ингибирует деструктивные процессы.

Использование промышленных отходов не только снизило, но и повысило барьерные свойства — эффект, который может быть обусловлен образованием наноразмерных интерметаллических слоев в цементной матрице.

5.2 Экономическая эффективность применения разработанного состава литого модифицированного бетона с комплексной добавкой и диоксидом кремния

Для обоснования эффективности использования готового модифицированного бетона был проведен сравнительный анализ: с одной стороны, существующей заводской технологии (вариант 1), а с другой стороны, новой технологической схемы, предусматривающей введение в бетонную смесь комплексной добавки и аморфного кремнезема (вариант 2). За основу расчетов взяты данные производства ООО «Темирбетон-1», рассчитанного на годовой выпуск 110 тыс. куб. м бетонных изделий. Сводные данные по потреблению материальных ресурсов и основным экономическим показателям приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Расчет затрат

Наименование материала	Ед. изм.	Цена, тенге	Годовой расход	Сумма, тыс. тенге
Вариант 1 – литая бетоная смесь без добавок (основной)				
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	тн	36000	81100	2919600,0
Природный песок, $М_к$=2,5	тн	2100	157750	331275,0
Гранитный щебень, фр. 5–15 мм	тн	4750	179550	852862,5
Вода водопроводная холодная	м^3	100,0	26780	2678,0

ГиперпластификаторAR122	тн	380000	243,3	92454,0
Итого:				4198869,5
Вариант 2 – литая бетонная смесь с комплексной добавкой (разработанный)				
Полифракционное вяжущее	тн	40000	56526,7	2261068,0
Природный песок, $М_к$=2,5	тн	2100	159750,0	335475,0
Гранитный щебень, фр. 5–15 мм	тн	4750	182197	865435,75
Диоксид кремния марки МК-95	$м^3$	15000	9975,3	149629,5
Вода водопроводная холодная	$м^3$	100,0	26780	2678,0
Гиперпластификатор AR122	тн	380000	243,3	92454,0
Повидон-К30	кг	1725	113,05	195,01
Полипропиленовое волокно (ПФ)	тн	750	395,69	296,77
Итого:				3707232,03

В производственном году на нужды отопления и горячего водоснабжения планируется потребить 67 060 Гкал тепловой энергии, расчет стоимости этих ресурсов зафиксирован в табл.5.3. Что касается потребления холодной воды, то ее объем определяется с учетом нормативов на технологические операции и санитарно-технические нужды в соответствии с требованиями «СНиП 2.04.01-85*» СП 30.13330.2016, регламентирующего проектирование внутренних систем водоснабжения и канализации зданий.

Таблица 5.3 – Расчет стоимости теплоэнергии и воды

Наименование затрат	Ед. изм.	Кол-во	Цена на ед. изм., тенге	Сумма, тыс. тенге
Вариант 1 – литая бетоная смесь без добавок (основной)				
Горячая вода	Гкал	68060	1970	134078,2
Холодная вода	$м^3$	27785	100	2778,5
Итого:				136856,7
Вариант 2 – литая бетонная смесь с комплексной добавкой (разработнный)				
Горячая вода	Гкал	68060	1970	134078,2
Холодная вода	$м^3$	27785	100	2778,5
Итого:				136856,7

Таблица 5.4 – Расчет стоимости электроэнергии

Наименование затрат	Ед. изм.	Кол-во	Цена на ед. изм., тенге	Сумма, тыс. тенге
Вариант 1 – бетоная смесь без добавок (основной)				
Годовой расход электроэнергии, в том числе:	кВт·ч	5700000	30	171000,0
на технологические нужды		5400000	30	162000,0
на освещение		300000	30	9000,0
Вариант 2– литая бетонная смесь с комплексной добавкой (разработнный)				
Годовой расход электроэнергии, в том числе:	кВт·ч	5800000	30	174000,0
на технологические нужды		5500000	30	165000,0
на освещение		300000	30	9000,0

При расчете себестоимости производства цементного бетона соблюдаются требования, изложенные в «Инструкции по планированию, расчету и учету затрат на предприятиях по производству железобетонных резервуаров для оросительных сетей». Систематические результаты расчета материальных и технологических затрат на производство товарной продукции сведены в таблицу 5.5.

Таблица 5.5 – Сводный расчет затрат на производство

Элементы затрат	Общая сумма, тыс. тенге	
	Вариант 1 (основной)	Вариант 2 (разработанный)
1. Сырьевые материалы для производства бетонной смеси	4198869,5	3707232,03
2. Теплоэнергия	134078,2	134078,2
3. Электроэнергия	171000,0	174000,0
4. Вода холодная	2778,5	2778,5
5. Всего полная себестоимость пр-ва	4506726,2	4018088,5
6.Всего полная себестоимость производства на 1м^3 ЛМБ	37,556	33,484

Определение годового экономического эффекта, связанного с применением приготовленного состава литого модифицированного бетона, производится по следующей формуле:

$$Э = (З_1 – З_2) \times А = [(С_1 + Ен \times К_1) – (С_2 + Ен \times К_2)] \times А,$$

где:

$З_1$, $З_2$ — приведённые затраты на выпуск единицы продукции соответственно без и с использованием комплексной добавки;

$С_1$, $С_2$ — себестоимость продукции без добавки и с добавкой;

$К_1$, $К_2$ — удельные капитальные вложения;

Ен — норматив эффективности капитальных вложений (принят 0,15);

А — годовой объем выпуска продукции, м^3.

Подставляя расчетные данные:

$Э = [(37,457 + 0,16 \times 0) – (32,474 + 0,16 \times 10)] \times 120000 = 308640,0$ тыс. тенге

В результате расчетов определено, что переход на технологию с использованием полифракционного вяжущего в сочетании с комплексной смесью, содержащей гиперпластификатор АР122, полимер повидон-К30 и микросиликат МК-95, позволит сэкономить 2462 тенге на кубометре уложенного модифицированного бетона, исходя из уровня цен 2024 года.

5.3 Опытное внедрение эффективного литого модифицированного бетона в производство железобетонных лотков дорожных и оросительных

В качестве площадки для опытно-промышленной отработки технологии литого модифицированного бетона (ЛМБ) выбрано ООО «Темирбетон-1», что положило начало разработке технических решений, сочетающих инновационность и экономическую эффективность. В число основных задач вошли: выбор производственной площадки, анализ условий внедрения разработанной технологии, освоение производства железобетонных изделий (резервуары для дорожного и мелиоративного строительства), а также разработка нормативной базы, регламентирующей процесс производства и схему контроля качества. Реализация данных этапов позволила апробировать внедрение технологии ЛКМ в реальных производственных условиях и определить потенциал ее широкого использования в строительной отрасли.

В ходе практического применения технологического регламента ТР 250117-1412-21022004-2024 «Бетон модифицированный литой на основе комплексного модификатора и полифракционного вяжущего с отходами ферросплавной промышленности для строительства» [Приложение 1] на предприятии «Железобетон-1» организована и внедрена опытно-промышленная серия, разработанная и утвержденная ТОО «ЛМБ2022»: изготовлено 200 железобетонных лотков Л9-11 и дополнительно 100 поливных баков ЛР-6.

При приготовлении литой модифицированной бетонной смеси использовались следующие материалы: цемент марки Цем I производства ООО «Стандарт Цемент» (г. Шымкент), соответствующий требованиям ГОСТ 31108-2020 [94], прочностью 2 МПа на 26,7 сутки и 28 МПа на 45,4 сутки, временем начала 165 минут и временем окончания 480 минут, удельной поверхностью 3500 см2/г, нормальной плотностью 26%, удельной плотностью 3150 кг/м3 и насыпной плотностью 1250 кг/м3; Песок карьерный с удельной плотностью 2612 кг/м3, модулем упругости 2,5, насыпной плотностью 1660 кг/м3 и содержанием глины и пыли 1,1% производства ООО «Арна» соответствует ГОСТ 8735-88 [96]; Песок карьерный [98] гранитный щебень сечением 98 мм от ООО «Таскум», произведенный в соответствии с ГОСТ 5-15-8267, 1400, морозостойкость 400 циклов, фракция игольчатых и пластинчатых зерен 11%, содержание мелких примесей 0,81% и насыпная плотность 1405 кг/м3; Гиперпластификатор ar24211 [34], разработанный компанией «Arirang Group LLP» и соответствующий требованиям ГОСТ 22211-2008 [34], изготовлен на основе эфиров поликарбоксилатов и применяется в количестве 1,7% от массы клея для повышения его подвижности без ухудшения прочностных характеристик; Раствор поливинилпирролидона водорастворимый полимер повидон-к30 производства «aha International» (Китай); Микрокремний марки МК-95 «Тау-Кен Темир» производства СТ ТУ 13124000-1446002-2018, размер частиц в диапазоне 5-50 мкм и содержанием диоксида кремния 95,47%; флаг 5952-002-13307094-2008, длина волокна 12 мм, температура плавления 160 с,

стойкость к щелочным средам, диаметр 16,19 мкм, относительное удлинение в диапазоне 23-35%, прочность 0,57 х 103 МПа, плотность 0,91 г/см3 и модуль упругости 3,5 х 103 МПа.

Качество всех использованных компонентов бетонной смеси соответствовало установленным требованиям нормативно-технической документации. Изготавливаемые железобетонные лотки были ориентированы на полное соответствие стандарту ГОСТ 32955-2014 [130]. В рамках опытного производства были задействованы как контрольные (заводские) рецептуры ЛМБ, так и разработанные экспериментальные составы, включающие полифракционное вяжущее и отход ферросплавного производства в качестве минеральной добавки. Все данные по составам представлены в таблице 5.6.

Производство железобетонных емкостей осуществлялось на предприятиях ТОО «Темирбетон-1», где внедрение автоматизированных агрегатных и поточных комплексов обеспечивало поддержание стабильных технологических режимов, а также выпуск продукции определенного уровня качества.

Таблица 5.6– Испытуемые на производстве составы смесей ЛМБ

Материалы	Расход на 1 м^3 бетонной смеси, кг/м^3	
	Контрольный (заводской) ПЦ+ 1,7% AR122	ПВ+1,7% AR122+0,2% Повидон-К30 + 15%МК-95 + 0,7%ПФ
ЦЕМ I 42,5Н	440	-
Полифракционное вяжущее ПВ	-	375
Вода	170	170
Гранитный щебень	890	890
Песок	830	830
Гиперпластификатор AR122	7,5	7,5
Микросилика МК-95	-	65
Повидон-К30	-	0,88
Полипропиленовое волокно (ПФ)	-	3,08

Заполнители и цемент подаются в бетоносмесительную установку (БСУ) через скиповые конвейеры и шнековые питатели, при этом каждый компонент проходит процедуру индивидуального взвешивания, дозирования и подачи непосредственно в смеситель. Производственный процесс на агрегатно-поточной линии включает несколько функциональных зон: участок подготовки, формовочный пост и тепловую обработку в ямных камерах. Арматурные изделия поступают с арматурного участка с использованием самоходных тележек.

Форма, прошедшая этап распалубки, направляется на подготовительный пост, где её поверхность тщательно очищается от остатков затвердевшей

бетонной смеси с применением скребков, металлических щёток и метёл. Далее на очищённую поверхность равномерно наносится тонкий слой эмульсии с помощью пневматического распылителя. После подготовки в форму укладываются арматурные элементы, которые фиксируются в проектном положении согласно технической документации.

Поступающая с БСУ бетонная смесь доставляется по бетоновозной эстакаде и равномерно распределяется по форме с помощью бетоноукладчика. После укладки осуществляется заглаживание поверхности изделия и установка монтажных петель. Кольца петель устанавливаются в вертикальном положении непосредственно после бетонирования. Далее форма с изделием перемещается мостовым краном в пропарочную камеру в соответствии с принятой схемой рационального заполнения. Камера герметично закрывается с использованием автоматического гидропривода. После завершения загрузки начинается процесс тепловлажностной обработки.

Режим обработки включает следующие этапы:

Предварительная выдержка в течение 30 минут при температуре 20 °С.

Подъём температуры до 70 °С за 3 часа.

Изотермическая выдержка при 70 °С на протяжении 4 часов.

Снижение температуры до 40 °С в течение 2 часов.

По завершении тепловлажностной обработки формы поступают на пост распалубки, где изделия извлекаются с помощью мостового крана. После прохождения контроля качества ОТК, готовая продукция направляется на склад, доставка осуществляется самоходной тележкой (рисунок 5.1).

Рисунок 5.1 - Железобетонный лоток типа ЛР-6 заформованный из предлагаемого состава ПВ+1,7%AR122+0,2% Повидон-К30+15%МК-95+ 0,7%ПФ на заводе Темирбетон-1.

Техническая эффективность разработанного состава литого модифицированного бетона, включающего полифракционное вяжущее, отход ферросплавного производства и полипропиленовое волокно, была оценена по совокупности физико-технических показателей, отражённых в таблице 5.7. Сравнительный анализ результатов производственных испытаний композиции ПВ+(1,7% AR122+0,2%повидон-К30+15%МК-95)+ПФ на 0,7% по сравнению с контрольным заводским вариантом выявил следующие закономерности: увеличение прочности при сжатии на 40,7%; на 32,2% увеличивается прочность на растяжение при изгибе; Коэффициент условной прочности на разрыв скачка снизился на 38,5%, а водопоглощение материала уменьшилось на 54%; уровень водонепроницаемости увеличился на три уровня давления; Показатель морозостойкости увеличился вдвое.

Таблица 5.7 – Физико-технические свойства литого модифицированного бетона на основе полифракционного вяжущего с отходами ферросплавной промышленности полученные в ходе производственных испытаний

Показатели смеси и бетона	Контрольный (заводской) ПЦ+ 1,7% AR122	ПВ+1,7%AR122+0,2 % Повидон-К30 + 15%МК-95 + 0,7%ПФ	ГОСТ 32955-2014 Лотки железобетонные. Технические условия
Удобоукладываемость Марка/ОК см	SF 1-640мм	SF2-680мм	-
Средняя плотность, кг/м^3	2368	2404	2200-2500
Предел прочности на сжатие, МПа/Класс бетона	47,1/В30	66,3/В50	В30
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	5,31 $B_{tb}4$	7,02$B_{tb}5$	$B_{tb}4$
Условный коэффициент интенсивности напряжений, МПа×м^{0,5}	0,052788	0,073124	-
Водопоглощение, % масс.	4,6	2,5	5
Марка бетона по водонепроницаемости	W6	W12	W6
Марка бетона по морозостойкости, F_1	300	600	200

Оценка реализации разработанных технических решений и анализ результатов испытаний подтвердили целесообразность и высокую эффективность использования предлагаемого состава модифицированного бетона, заливаемого с добавлением отходов ферросплавов. Данный материал продемонстрировал стабильность при эксплуатации в изделиях и конструкциях,

подверженных агрессивным воздействиям. Полученные в ходе работы научные результаты представлены в пяти публикациях, две из которых опубликованы в международных журналах, входящих в базу данных Scopus. Кроме того, результаты исследования защищены патентом [135 136 137].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги проведённого исследования:

1. Разработан литой модифицированный бетон с тройной системой добавок (гиперпластификатор, микрокремнезем, полимер, полипропиленовое волокно), обладающий высокими физико-механическими характеристиками: прочность на сжатие — 67,1 МПа, на изгиб — 7,28 МПа, водопоглощение — 2,1%, морозостойкость — F600, водонепроницаемость — W12. Использование отходов ферросплавного производства дополнительно повысило влагостойкость и долговечность материала.

2. Оптимизация гранулометрического состава цементного вяжущего (с размером фракции: 12 мкм — 15%, 6,6 мкм — 75%, 4,9 мкм — 10%) и точный подбор дозировок модифицирующих добавок (0,2% повидон-К30, 0,7% полипропиленовое волокно) обеспечили повышение прочности при снижении себестоимости.

3. Рентгенофазовый анализ показал снижение содержания портландита на 26% и активное развитие пуццолановой реакции. Через 6 месяцев степень гидратации достигла 82%, что подтверждает наличие клинкерного резерва и потенциал материала к долговременной прочности.

4. Электронно-микроскопический анализ выявил плотную микроструктуру цементного конгломерата с равномерно распределённой мелкопористостью (0,1–0,5 мкм) и стабилизированной фазой эттрингита (60–70 нм), что способствует снижению трещинообразования.

5. Механические испытания подтвердили улучшение прочности при сжатии и изгибе по сравнению с контрольными составами: рост на 29% и 32,4% соответственно. Добавление полипропиленового волокна обеспечило дополнительный прирост прочности и повышение деформативной устойчивости.

6. Композит показал высокую стойкость к химической деградации (NaCl, HCl, вода, Na_2SO_4), с незначительными потерями массы и прочности. Производственная апробация на ТОО «Темирбетон-1» доказала применимость технологии в реальных условиях. Экономический эффект составил 2572 тенге на м³ продукции.

Перспективы: использование расширенного спектра вторичных минеральных компонентов для повышения прочности, экологичности и экономичности литого бетона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. EN 206:2013+A2:2021 Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия. 2021. https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/4f3d2008-978a-47ec-bc12-5660aa40e04d/en-206-2013a2-2021?srsltid=AfmBOophXxzudOup

2. Паламарчук А.А., Шишакина О.А., Кочуров Д.В., Аракелян А.Г // Полимерные бетоны – перспективные строительные материалы // ВГУ. 2018. https://s.eduherald.ru/pdf/2018/6/19373.pdf

3. Ахметов Д.А., Роот Е.Н. // Опыт применения самоуплотняющихся бетонов в Республике Казахстан. // 2017. https://moluch.ru/archive/182/46775/

4. Петров М.С. Добавки к бетону для гидромелиоративного строительства //Бетон и железобетон. – 1981. – № 9. – С.12-14.

5. Дронов В.М. Технология и свойства высокоэффективного модифицированного гидротехнического бетона: автореферат… к.т.н., 2005. –24 с.

6. Л. А. Титова, М. И. Бейлина, В. Л. Хлопук, В. А. Шабалин // Разработка национального стандарта на методы испытания самоуплотняющейся бетонной смеси. // Вестник НИЦ Строительство. 2021. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-108-116

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. Баженов Ю.М. Многокомпонентные мелкозернистые бетоны // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2001. – №10(33). – С. 24-30.

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. Айткалиева Г.С, Утетилеуов Е.И. Полимербетоны – достоинства и недостатки / ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ МЕН ТЕХНИКАКСЫ // ISSN 1680-9165.2018. https://cyberleninka.ru/article/n/polimer-betony-dostoinstva-i-nedostatki/viewer

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. Алмакаева Ф.М. Алмакаева Э.Ф. Долговечность строительных конструкций технических сооружений нефтехимических комплексов / НХТИ КНИТУ. 2019. https://cyberleninka.ru/article/n/dolgovechnost-stroitelnyh-konstruktsiy-tehnicheskih-sooruzheniy-neftehimicheskih-kompleksov/viewer

14. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности строительных конструкций/ Строительные науки. 2015. https://cyberleninka.ru/article/n/o-sovremennyh-metodah-obespecheniya-dolgovechnosti-zhelezobetonnyh-konstruktsiy/viewer

15. Николаенко Ю.В., Сташевская Н.А., Окольникова Г.Э. Применение самоуплотняющихся бетонов в монолитном домостроении // Системные технологии. Москва. 2017. https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-samouplotnyayuschihsya-betonov-v-monolitnom-domostroenii/viewer

16. Чистов Ю.Д., Тарасов А.С. Разработка многокомпонентных минеральных вяжущих веществ. // Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева. 2003. https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-mnogokomponentnyh-mineralnyh-vyazhuschih-veschestv/viewer

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

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

21. 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.

22. Хархардин, А.Н. Структурная топология дисперсных систем / А.Н. Хархардин, В.В. Строкова // Учебное пособие. Белгород: Изд-во БГТУ. 2007. 132 с.

23. Хархардин, А.Н. Структурная топология безлигандных микро- и наночастиц / А.Н. Хархардин // Известия вузов. Строительство. 2007. №1. С.130-138.

24. Хархардин, А.Н. Структурная топология дисперсных систем взаимодействующих микро- и наночастиц / А.Н. Хархардин // Известия вузов. Строительство. 2011. №5. С.119-125.

25. V.B. Petropavlovskaya, T.B. Novichenkovab, Y.Y. Poleonova, A.F. Buryanov. Application of mathematical and computer modeling methods to manufacture high-strength unfired gypsum materials // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 57. – P. 906-913. – DOI 10.1016/j.proeng.2013.04.115. – EDN SLJQKF.

26. Хархардин, А.Н. Уравнения координационного числа в неупорядоченных системах / А.Н. Хархардин, А.И. Топчиев // Успехи современного естествознания. 2003. №9. С.47-53.

27. 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 GXYBHA.

28. 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.

29. A. Buryanov, V. Petropavlovskaya, T. Novichenkova, K. Petropavlovskii. Simulating the structure of gypsum composites using pulverized basalt waste // MATEC Web of Conferences, Warsaw, 19–21 августа 2017 года. Vol. 117. – Warsaw: EDPSciences, 2017. – P. 00026. – DOI 10.1051/matecconf/201711700026. – EDNPSADFN.

30. 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.

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

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

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

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

35. 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.

36. 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.

37. 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.

38. 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.

39. 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.

40. 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.

41. 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.

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

43. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны // Москва: Парадиз. – 2010. – 258 с.

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

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

46. 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.

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

48. Рамачандран В.С. Добавки в бетон / В.С. Рамачандран, Р.Ф. Фельдман, М.Коллепарди, П.К. Мехта. - М.: Стройиздат, 1988. – 575.

49. Афанасьев Н.Ф. Добавки в бетоны и растворы / Н.Ф. Афанасьев, М.К. Целуйко. - Киев: Будивэльник, 1989. - 128 с.

50. Энтин З.Б. Многокомпонентные цементы / З.Б. Энтин, Б.Э. Юдович // Научные труды. - М.: НИИцемент, -1994., вып. 107. - С. 3-76.

51. 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.

52. 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.

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

54. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны важнейшее направление технического прогресса / В.Г. Батраков // Тезисы доклада конференции межрегиональной ассоциации "Железобетон". - М.,1995. - С. 4-6.

55. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. - М.: Стройиздат, 1981. - 464 с.

56. 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.

57. Рояк С.М. Специальные цементы / С.М. Рояк, Г.С Рояк. - М.: Стройиздат, 1983. - 279 с.

58. 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.

59. Ребиндер П.А. Поверхностно-активные вещества. – М.: Знание. – 1961. – 43 с.

60. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсионных системах. Физико-химическая механика. – М.: Наука. – 1979. – 384 с.

61. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсионных системах. Коллоидная химия. – М.: Наука. – 1978. – 368 с.

62. 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.

63. Рахимов М.А., Рахимова Г.М., Хан М.А., Тоимбаева Б.М. Разработка состава комплексной добавки полифункционального действия СС-3ТН // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 1. – С. 112-116.

64. 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.

65. Степанова В. Ф. Долговечность бетона. – Москва: Ассоциация строительных вузов, 2014 – 126 с.

66. 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.

67. Патуроев В. В. Полимербетоны / НИИ бетона и железобетона. – М.: Стройиздат, 1987. – 286 с.

68. 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.

69. O'Sell G., Joneas J.J. Yield and transient effects during the plastic deformation of solid polymers // Mater.Sci. – 1981. – V.16, № 8. – P. 1956–1974.

70. Дворкин Л.И., Выровой В.Н., Чудновский С.М. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. – Киев: Будівельник. – 1991. – 136 с.

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

72. 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.

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

74. 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.

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

76. 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.

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

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

79. Kohno Kiyoshi, Amo Kazuo, Horii Katsunori, TakadoAkiza 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.

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

81. Айлер Р. Коллоидная химия кремнезема и силикатов. – М.: Мир. – 1982. – 1128 с.

82. Чукин Г.Д. Химия поверхности и строение дисперсного кремнезема. – М.: Паладин. – 2008. – 172 с.

83. Лайдабон Ч.С. О новом способе поверхностной модификации бетонов // Изв. Вузов. Строительство. – 2004. – №2. – С. 11-14.

84. Носенко А.А., Половнева С.И. Методы и устройства для измерения удельной поверхности дисперсных материалов // Известия вузов. Прикладная химия и биология. Том 7. ИНИТУ 2017. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-113-121.

85. 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

86. Кузьмин В.С., Чернышев В.В., Яшкир В.А., Меркулов В.А. Рентгеновская порошковая дифрактометрия // Ведомости НЦЭСМП. 2015. https://cyberleninka.ru/article/n/rentgenovskaya-poroshkovaya-difraktometriya-prakticheskoe-primenenie-v-ekspertize-lekarstvennyh-sredstv/viewer

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

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

89. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. – М.: Стандартинформ. – 2018. – 33 с.

90. ГОСТ 12730.5-2018. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости. – М.: Стандартинформ. – 2019. – 19 с.

91. ГОСТ 12730.3-2020. Бетоны. Метод определения водопоглощения. – М.: Стандартинформ. – 2021. – 3 с.

92. ГОСТ 27677-88. Защита от коррозии в строительстве. Бетоны. Общие требования к проведению испытаний. – М.: Издательство стандартов. – 1988. – 6 с.

93. BS EN 196-1:2016 «Methods of testing cement-Part 1: Determination of strenght» https://ru.scribd.com/document/787667533/BS-EN-196-1-2016

94. ГОСТ 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. – М.: Стандартинформ. – 2022. – 14 с.

95. ГОСТ 30515-2013. Цементы. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ. – 2019. – 37 с.

96. ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ. – 2018. – 25 с.

97. ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. – М.: Стандартинформ. – 2007. – 8 с

98. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. – М.: Стандартинформ. – 2018. – 11 с.

99. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. – М.: Стандартинформ. – 2012. – 11 с.

100. ГОСТ 12.1.007-76. «Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности».

101. Жилякова Е.Т., Агарина А.В., Новикова М.Ю., Тимошенко Е.Ю. Изучение физико-химических свойств производных поливинилпирролидона. // Научные ведомости. Том 41. БГНИУ. 2015г.

102. ГОСТ Р58894-2020 «Микрокремнезем конденсированный для бетонов и строительных растворов. Техническиеусловия» Inter-Governmental Council on Standardization, Metrology, and Certification. 2020. https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293720/4293720399.pdf

103. The Effect of Low-Modulus Plastic Fiber on the Physical and Technical Characteristics of Modified Heavy Concretes Based on Polycarboxylates and Microsilica / D.A. Akhmetov, Y.V. Pukharenko, N.I. Vatin, S.B. Akhazhanov, A.R. Akhmetov, A.Z. Jetpisbayeva, Y.B. Utepov // Materials. — 2022. — Vol. 15, No. 7. — P. 2648. https://doi.org/10.3390/ma15072648

104. WenqiangZuo, Jiaping Liu, Qian Tian, Wen Xu, Wei She, Pan Feng, Changwen Miao / Optimum design of low-binder Self-Compacting Concrete based on particle packing theories // Construction and Building Materials.Volume 163, 2018, Pages 938-948 https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.167

105. 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

106. 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.

107. Okamura, H.; Ouchi, M. Self-Compacting Concrete. ACT 2003, 1, 5–15, doi:10.3151/jact.1.5

108. S. Christopher Gnanaraj, Ramesh BabuChokkalingam, G. LiziaThankam, S.K.M. Pothinathan / Durability properties of self-compacting concrete developed with fly ash and ultra fine natural steatite powder // Journal of Materials Research and Technology – 2021.-Vol. 13 - https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.074

109. ГОСТ 5802-86. Растворы строительные. Методы испытаний. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30039136&pos=2;-106#pos=2;-106

110. СТ РК EN 12350-8-2023. Испытание бетонной свежеприготовленной смеси. Часть 8. Самоуплотняющийся бетон. Испытание на расплыв. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=35455286

111. Aste, Tomaso. (2006). Volume Fluctuations and Geometrical Constraints in Granular Packs. Physical review letters. 96. 018002. 10.1103/PhysRevLett.96.018002.

112. Riccardo Isola. Packing of granular materials. University of Nottingham, 2008.

113. 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.

114. Seckendorff, Jennie; Hinrichsen, Olaf (2021): Review on the structure of random packed-beds. In Can J Chem Eng 99 (S1), p. 385.

115. 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.

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

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

118. 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.

119. 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.

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

121. Клюев А.В., Клюев 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.

122. 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.

123. 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.

124. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: ИздательствоАСВ, 2006. 368 с.;

125. 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.

126. 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.

127. 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.

128. 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.

129. 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.

130. ГОСТ 32955—2014. Лотки дорожные водоотводные. Технические условия. https://meganorm.ru/Data2/1/4293759/4293759363.pdf

131. 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.

132. 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.

133. 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.

134. Ш.М. Рахимбаев, Н.М.Толыпина Повышение коррозионной стойкости бетонов путем рационального выбора вяжущего и заполнителей. – Белгород: БГТУ. – 2015. – 250 с.

135. Ilyas Abdraimov, Awwad Talal, Bakhadyr Kopzhassarov, Mussa Kuttybai, Daniyar Akhmetov,and Rishat Tynybekov. STRENGTH AND DURABILITY EFFECT OF SELF-COMPACTING CONCRETE REINFORCEMENT WITH MICRO-SILICA AND VOLUME FIBER. // International Journal of GEOMATE,July, 2024 Vol.27, Issue 119, pp.26-33. DOI: https://doi.org/10.21660/2024.119.4334

136. MederbaySaduakasov, AwwadTalal, BakhadyrKopzhasarov, DaniyarAkhmetov, Rashid Nurumov, GeorgiyTokmajeshvili and MussaKuttybay. STRUCTURAL THERMAL INSULATING FOAM CONCRETE PROPERTIES FOR FOUNDATION INSULATION. // International Journal of GEOMATE, Feb., 2025 Vol.28, Issue 126, pp.25-32. DOI: https://doi.org/10.21660/2025.126.4545

137. Патент на полезную модель. Состав для приготовления самоуплотняющегося бетона. Заявка № 2024/1639.2. 14.03.20

Приложение 1

УТВЕРЖДАЮ
Директор
ТОО «ЛМБ2022»,
_____
«___» _____ 2024 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ

ТР 250117-1412-21022004-2024

«Литой Модифицированный бетон на основе полифракционного вяжущего с комплексным модификатором и отходом ферросплавной промышленности для строительства»

Научный консультант: Профессор кафедры «Строительные материалы и экспертиза» ЮКИУ им. М. Ауезова	подпись, дата	Б.Т. Конжасаров
Докторант кафедры «Строительные материалы и экспертиза» ЮКИУ им. М. Ауезова	подпись, дата	М. Куттыбай
Заместитель по производству ТОО «ЛМБ»	подпись, дата	В.А. Тян
Мастер БСУ ТОО «ЛМБ2022»	подпись, дата	Е.Т. Махатов

Алматы 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 13838
1 Область применения 139
2 Нормативная документация 140
3Сокращения иобозначения 142
4Термины иопределения 140
5Общиеположения 145
6Требования к подбору состава ЛМБ и сырьевым материалам 146
6.1 Подбор составабетона 146
6.2 Принцип подбора составов литых бетонныхсмесей 146
6.3 Требования к материалам для приготовленияЛМБ 149
7 Требования к ЛМБ 154
7.1 Требования к ЛБС 154
7.2 Классификация ЛМБ 154
8 Требования к бетону из литых бетонных смесей 156
9 Требование к производству работ и потребность в механизмах 159
9.1 Технология приготовления литых бетонныхсмесей 159
9.2 Транспортирование бетоннойсмеси 162
9.3 Технологиябетонирования 163
10 Правила приемки бетонныхсмесей 167
11 Выдерживание и уход забетоном 168
12 Контроль качества материалов при приготовленииЛМБ 169
13 Безопасность труда при производстве работ сЛМБ 170
Приложение А 171
Приложение Б 173
Список использованных источников 182

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий технологический регламент разработан на основании договора №3 от «10» мая 2023 г. в рамках договора между ТОО «ЛМБ2022» и профессором ЮКИУ им. М.Ауезова Копжасаровым Б.Т. и докторантом Куттыбай М.

Технологический регламент ТОО «ЛМБ2022» (далее Организация)распространяется на состав, укладку, уход литого модифицированного бетона (далееЛМБ) и литой бетонной смеси (далее ЛБС), а также методы испытания, транспортировки и приемки.

1 Область применения

1.1 Настоящий технологический регламент распространяется на состав, укладку, уход ЛМБ и ЛБС, а также на методы испытаний транспортировки и приемки.

1.2 Технологический регламент регламентирует требования к исходным материалам для приготовления литого модифицированного бетона.

1.3В технологическом регламенте приведены рекомендации по подбору составов, приготовлению, технологии ведения строительных работ с использованием ЛМБ.

2 Нормативная документация

ГОСТ	Название
8269	Межгосударственный стандарт. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ
8735	Межгосударственный стандарт. Песок для строительных работ. Методы испытаний
9758	Межгосударственный стандарт. Заполнители пористые неорганические для строительных работ
7473	Межгосударственный стандарт. Смеси бетонные. Технические условия.
8736	Песок для строительных работ. Технические условия
24211	Межгосударственный стандарт. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия.
26633	Межгосударственный стандарт. Бетоны тяжелые и мелкозернистые.Технические условия
31384	Межгосударственный стандарт. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования.
10178	Межгосударственный стандарт. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия
22266	Межгосударственный стандарт. Цементы сульфатостойкие. Технические условия
31108	Межгосударственный стандарт. Цементы общестроительные. Технические условия.
30515	Межгосударственный стандарт. Цементы. Общие технические условия.
8267	Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.
СТ РК EN 12350	Испытание бетонной смеси
10060	Межгосударственный стандарт. Бетоны. Методы определения морозостойкости.
18105	Межгосударственный стандарт. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.
13015	Межгосударственный стандарт. Изделия бетонные и железобетонные для строительства.
СП 63.13330	Свод правил. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.
24316	Государственный стандарт. Бетоны. Метод определения тепловыделения при твердении
СП 70.13330	Свод правил. Несущие и ограждающие конструкции
СП 43.13330	Свод правил. Сооружения промышленных предприятий
27338	Установки бетоносмесительные механизированные. Общие технические условия
52085	Межгосударственный стандарт. Опалубка. Общиетехнические условия
СНиП 12	Безопасность труда в строительстве. Общие требования
27339	Автобетоносмесители. Общие технические условия
12.04.021	Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Общие требования
427	Межгосударственный стандарт. Линейки измерительные

	металлические. Технические условия
9533	Межгосударственный стандарт. Кельмы, лопатки и отрезовки. Технические условия
10181	Межгосударственный стандарт. Смеси бетонные. Методы испытаний

3 Сокращения иобозначения

ЛМБ – литой модифицированный бетон
ЛБС - литая бетонная смесь
НТД – нормативно-техническая документация
СМК – система менеджментакачества
СМР – строительно-монтажные работы

4 Термины иопределения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

Литой модифицированный бетон: Бетон, изготовленный из бетонной смеси, способной уплотняться под действием собственного веса.

тяжелый бетон: Бетон на цементном вяжущем с плотными мелким и крупным заполнителями, средней плотности 2000—2500 кг/м³.

мелкодисперсная часть (порошковая часть): материал в составе с размером частиц менее 0,125мм.

Примечание - Фракции этого размера включают цемент, минеральные добавки и мелкие фракции заполнителей (соответствующие по зерновому составу минеральной добавке).

заполнители: зернистые природные или искусственные каменные сыпучие материалы. В зависимости от размера зерен заполнители делят на мелкий заполнитель - до 5(3) мм и крупный заполнитель - свыше5(3)мм.

плотный заполнитель: заполнитель из материала со средней плотностью зерен в пределах от 2000 до 3000 кг/м^3, определенной по ГОСТ 8269, ГОСТ8735.

легкий заполнитель: заполнитель из материала, имеющий плотность зерен, ниже 2000 кг/м^3 или насыпную плотность ≤1250 кг/м^3 по ГОСТ9758.

добавки: продукт, вводимый в бетонные и растворные смеси с целью улучшения их технологических свойств, повышения строительно-технических свойств бетонов и растворов и придания им новыхсвойств.

химические добавки: добавки органического или неорганического происхождения, применяемые для регулирования изменения самих свойств бетонной смеси и бетона, в виде водного раствора или эмульсии, а так же для направленного изменения скорости твердения бетона ирастворов.

минеральные добавки (микронаполнители): дисперсные (как правило, менее 0,125мм) инертные и пуццолановые добавки, неорганические природные или искусственные материалы, которые могут вводиться в бетонную смесь, в составе части вяжущего и/или мелкого заполнителя, в т.ч. для получения специальных свойств: для повышения и поддержания связности и устойчивости к расслоению. Применение таких добавок также позволяет регулировать расход цемента для снижения теплоты гидратации и уменьшения термическойусадки.

подвижность: один из показателей, характеризующих удобоукладываемость бетонной смеси, оцениваемый по осадке (ОК) или расплыву конуса (РК), отформованного из бетоннойсмеси.

заполняющая способность: способность свежеуложенной бетонной смеси заполнять все пространство опалубки под действием силытяжести.

устойчивость к расслаиванию (устойчивость к расслоению): способность бетонной смеси сохранять однородностьсостава.

расплыв конуса: средний диаметр расплыва бетонной смеси при использовании конуса для определения ееподвижности.

тиксотропность: склонность материала (например, ЛМБ) к прогрессирующей потере текучести в состоянии покоя и восстановлению текучести при приложении энергии.

формуемость: способность свежеуложенной бетонной смеси протекать через труднопроходимые узкие места, например, между стальными арматурными стержня- ми без расслоения иблокировки.

время прохождения через воронку: период времени в течение которого порция бетонной смеси объемом 10 литров истечет через стандартную V-образную воронку.

стабильность: способность бетонной смеси сохранять заданные характеристики в условиях незначительного изменения свойств или содержания сырьевых материалов.

вязкость: сопротивление течению материала (например, смеси ЛМБ) в начальный моментвремени.

Примечание - У ЛМБ вязкость определяется скоростью расплыва T_{500} при испытании на расплыв конуса или временем протекания в испытании с использованием V- образной воронки.

текучесть: свободный расплывбетоннойсмеси.

ложное схватывание цемента: преждевременная частичная или полная потеря подвижности цементным тестом, устраняемая с помощью механического воздействия.

лежалый цемент: цемент, сроком хранения более 6 месяцев. При просеивании пробы цемента сквозь сито с сеткой № 008 проходит менее 85 % массы просеиваемой пробы.

менеджмент качества - скоординированная деятельность по руководству и управлению организацией применительно к качеству.

несоответствие - невыполнениетребования.

обеспечение качества - часть менеджмента качества, направленная на создание уверенности, что требования к качеству будутвыполнены.

план качества - документ, определяющий, какие процедуры и соответствующие ресурсы, кем и когда должны применяться к конкретному проекту , продукции, процессу иликонтракту.

контроль качества – комплекс мероприятий и нормативных документов, направленных на поддержание качества (услуги) на заданномуровне.

5 Общие положения

Литой модифицированный бетон (ЛМБ) — это бетон, который не требует вибрирования при укладке и уплотнении. Литая бетонная смесь (ЛБС) способна укладываться под действием силы тяжести, полностью заполняя форму и достигая полного уплотнения даже густоармированных конструкциях. Затвердевший бетон отличается плотностью и однородностью, высоким классом поверхности и обладает такими же проектными свойствами и долговечностью, что и традиционный бетон, уплотняемый при помощи вибрации или других внешнихвоздействий.

Литой модифицированный бетон обеспечивает быструю укладку, ускоряет время строительства и равномерно распределяется в железобетонной конструкции. Текучесть и устойчивость смеси ЛБС к расслаиванию обеспечивают высокую степень однородности, минимальное образование пустот и стабильную прочность бетона, а также возможность получения высококачественной поверхностии долговечность конструкции. ЛМБ, как правило, имеет низкое водоцементное отношение, что способствует ускорению раннего набора прочности, распалубке в ранние сроки и скорейшему использованию элементов и конструкций.

Технологический регламент разработан для производителей и потребителей товарного бетона и применяется в ситуациях, когда между поставщиком и потребителем оговорены требования к техническим характеристикам свежеприготовленной бетонной смеси и затвердевшего бетона. Технологический регламент охватывает требования, предъявляемые к покупателям ЛМБ: условия подготовки места проведения бетонных работ и способов укладки, приводятся методы испытаний, для проверки качества литого модифицированного бетона, предложен метод подбора состава ЛМС, даны предложения по доставке и укладке товарного бетона, приведены особенности применения ЛМБ. Технологический регламент предназначен для специалистов проектных и строительных организаций, которые стремятся освоить производство этого вида бетона , а также повысить уровень своей квалификации и знаний о ЛМБ. Технологический регламент подготовлен на основании опыта [1],[2],[3] и накопленных сведений о ЛМБ [4] с учетом требований и положений[5, 6].

6 Требования к подбору состава ЛМБ и сырьевым материалам

6.1 Подбор составабетона

6.1.1 В соответствии с ГОСТ 7473 бетонные смеси, выпущенные производителем, должны обеспечивать получение бетонов с заданными показателями качества (бетонные смеси заданного качества) или иметь заданный состав (бетонные смеси заданногосостава.

6.1.2 Подбор состава бетона следует производить в соответствии с требованиями ГОСТ 27006 и настоящего технологического регламента с целью получения бетона в конструкциях с прочностью и другими показателями качества, установленными государственными стандартами, техническими условиями или проектной документацией на эти конструкции, при минимальном расходе цемента или другоговяжущего.

6.1.3 Подбор состава бетона должен выполняться по утвержденному заданию, разработанному в специализированных лабораториях, научно-исследовательских организациях по утвержденному заданию на подбор состава бетона.

6.1.4 Задание на подбор состава бетона должно быть составлено для конструкций конкретной номенклатуры, изготовляемых из бетона одного вида и качества по определеннойтехнологии.

6.1.5 Задание на подбор состава бетона должносодержать:

показатели качества бетонной смеси, условия транспортировки, укладки, выдерживания, длительность и режимы твердения бетона и другие условия производства, принимаемые по технологической документации, разработанной в соответствии с действующими стандартами, нормами иправилами;

нормируемые показатели качества бетона в соответствии с техническими требованиями проектной документации на конструкции конкретных видов, стандартов, техническихусловий;

показатели однородности прочности бетона и плотности бетона;

ограничения по составу бетона и применению материалов для его приготовления, установленные нормативно-технической и технологическойдокументацией.

6.1.6 Результаты подбора состава бетона, отвечающего требованиям утвержденного задания на подбор состава бетона (карта подбора состава бетона), должны быть оформлены в журнале подбора состава бетона и утверждены главным инженером предприятия-изготовителя бетонной смеси. Рабочие составы и дозировки подписывает руководитель лаборатории или другое лицом, ответственное за подбор состава бетона, назначенное в установленномпорядке.

6.2 Принцип подбора составовлитых модифицированныхбетонныхсмесей

6.2.1Составы литых модифицированныхбетонныхсмесейподбирают под конкретные конструктивные элементы с учетом густоты и шага армирования,

используемой технологии укладки литой бетонной смеси, а также в соответствии с требованиями по эксплуатацииконструкций.

6.2.2Подбор состава бетонной смеси рекомендуется проводить в следующем порядке:

Путем опытных замесов экспериментально определяем выбор количества крупного заполнителя.

Путем опытных замесов экспериментально определяем оптимальное отклонение отношение крупного и мелкого заполнителя.

Путем опытных замесов экспериментально определяем отношения воды и мелкодисперсной составляющей (МДС):

В цементном тесте

В цементном растворе

Определение потребности суперпластификатора

С соблюдением необходимой консистенции и постоянство характеристик путем опытных замесов определяем необходимое содержание цемента и активной минеральной добавки – микрокремнезема .

С использованием закона прочности бетона (1) – определить необходимое водоцементное отношение исходя из заданной прочности.

Исходя из полученного водоцементного отношения определить, содержание воды и гиперпластификатора путем опытных замесов с целью получения необходимых параметров и расплыва, вязкости и расслаиваемости смеси.

После серии опытных испытаний и определения средней плотности бетонной смеси, получения удовлетворительных характеристик бетонной смеси по удобоукладываемости и вязкости производится корректировка начального (номинального) состава литого модифицированного бетона с учетом следующих особенностей ЛМБ:

А) пониженное содержание крупного заполнителя

Б) повышенное содержание растворной части

В) повышенное содержание гиперпластификаторов

Г) Иногда наличие модификаторов вязкости

После корректировки номинального состава производится заливка серии образцов, которые проходят определение прочности на сжатие по истечении 28 суток

При значениях прочности, удовлетворяющих заданному классу бетона состав принимается для дальнейших производственных испытаний

При неудовлетворительных значениях прочности состав корректируется в соответствии с Основным Законом прочности бетона.

Расчет состава проводят с использованием основного закона прочности бетона (уравнение Скрамтаева – Балмея)

$R_б = AR_ц (Ц/В \pm 0,5)$, (1)

где $R_б$ – проектируемая прочность бетона; А – коэффициент, характеризующий качество заполнителей, изменяющийся в пределах 0,37 –

0,65; $R_ц$ – активность (марка) минерального вяжущего; Ц/В – показатель, характеризующий структуру бетона, фактически объем открытых капиллярных пор.

6.2.3 Вкачестве добавок могут быть использованы минеральные добавки и суперпластификаторы, органоминеральные добавки, модификаторы вязкости. В зависимости от условий производства в бетонную смесь могут вводиться добавки замедлители схватывания, ускорители твердения, противоморозные добавки, соответствующие ГОСТ24211.

6.2.4 В случае применения минеральной добавки в виде водной суспензии расход воды затворения следует корректировать из расчета содержания в ней сухого вещества.

6.2.5 При проектировании состава литой бетонной смеси нужно учитывать, что объем цементного теста должен быть больше, чем объем пустот, для того, чтобы зерна крупного заполнителя были полностью окружены слоем цементного теста.

6.2.6 В бетонах низких классов с относительно небольшим расходом цемента и минеральной добавкой для обеспечения необходимой связанности в системе и предотвращения расслаивания рекомендуется использовать модификаторы вязкости.

6.2.7 Проверку устойчивости и стабильности свежеприготовленнойлитой бетонной смеси рекомендуется производить при подборе состава ЛМБ путем изменения дозировки воды в пределах от 5 до 10 л/м^3 с оценкой изменения свойств свежеприготовленной бетонной смеси. Такая проверка подтвердит ее устойчивость или укажет на необходимость дальнейших корректировок состава, а также обеспечит требуемую надежность подбора — стабильность свойств бетонной смеси, гарантирующую уменьшение возникновения отклонений на месте производства работ в связи с возможными колебаниями влажности на месте хранения заполнителей или колебаниями гранулометрического состава.

6.2.8 Ориентировочные нормы содержания мелкофракционных материалов (≤ 0,125 мм) (минеральная добавка, цемент, пыль из инертных материалов) в составе ЛМБ:

-для ЛБС с наибольшей фракцией зерен 10 мм содержание мелкой фракции (≤ 0,125 мм) должно быть не менее 550 кг/м^3;

-для ЛБС с наибольшей фракцией зерен 20 мм содержание мелкой фракции (≤ 0,125 мм) должно быть не менее 500 кг/м^3.

6.2.9На основании содержания мелкофракционных материалов можно определить следующее содержание цемента и минеральной добавки в зависимости от требуемого качества бетона и используемого песка:

6.2.10Для получения литой бетонной смеси с требуемыми характеристиками содержание воды следует принимать согласно серии проведенных испытаний.

6.2.11 Примеры применяемых в международной практике составов ЛМБ представлены в таблице Приложение А.

6.2.12Примерные составы литых модифицированныхбетонных смесей и полученных составов ТОО «ЛМБ2022» даны в ПриложенииА.

6.2.13Общая схема подбора состава ЛМБприведенана рис.1

Рисунок 1 - Порядок подбора состава смеси

6.3 Требования к материалам для приготовленияЛМБ

6.3.1 Материалы для приготовления ЛМБ должны соответствовать ГОСТ 26633, стандартам и техническим условиям на материалы конкретныхвидов.

6.3.2 Для бетонов, эксплуатирующихся в агрессивных средах, качество материаловидругиеграничныеусловияпосоставубетонанеобходимоприниматьпо ГОСТ31384, техническим условиям, проектной и технологической документации на изделия и конструкции конкретныхвидов.

6.3.4 Применение материалов с показателями качества, отличных от требований настоящего технологического должно быть обосновано предварительными исследованиями для подтверждения возможности получения бетонных смесей и бетонов со всеми нормируемыми показателямикачества.

6.3.5 Требования к вяжущим материалам для приготовления бетонныхсмесей

6.3.5.1 Для производства литого модифицированногобетона следует использовать цементы соответствующие ГОСТ 10178, ГОСТ 31108. Для гидротехнических конструкций в качестве вяжущих материалов следует применять портландцемент нормированного состава с содержанием C_3A не более 8%, соответствующий требованиям ГОСТ 10178, а для тоннельных конструкций, кроме того, ЦЕМ I, соответствующий ГОСТ 31108, а также сульфатостойкиецементы, соответствующие требованиям ГОСТ22266.

6.3.5.2 При возведении конструкций в условиях агрессивной среды выбор цементов следует осуществлять с учетом положений ГОСТ 31108.

6.3.5.3 Следует исключить применение цементов с признаками «ложного схватывания». Необходимо обеспечить проверку цементов на «ложное схватывание» в составе с применяемыми химическими добавками. Не допускается применение «лежалых»цементов.

6.3.5.4 Для производства сборных конструкций, подвергаемых тепловой обработке, следует применять цементы I и II группы эффективности при пропаривании согласно требованиямГОСТ10178.

6.3.5.5 Марку по ГОСТ 10178 и ГОСТ 22266 или класс по ГОСТ 31108 и вид цемента следует назначать в соответствии с требованиями, имеющимися в проекте, где должно быть указано назначение конструкции, класс бетона по прочности на сжатие, марка бетона по морозостойкости и марка бетона поводонепроницаемости.

6.3.6 Требования кзаполнителям

6.3.6.1Вкачестве крупного заполнителя следует применять щебень из плотных горных пород фракции 5-20, 3-10, 5-10 мм или смеси фракций (3÷5) - 10 мм и 10-20 мм по ГОСТ 8267, ГОСТ 26633.

а) содержание зерен слабых пород должно быть не более 10%;

б) марка щебня по прочности (дробимости) должна быть не менее:

800 - для бетонов классаВ30;

1000 - для бетонов классаВ35-В40;

1200 - для бетонов класса В45 ивыше;

морозостойкость щебня должна соответствовать ГОСТ8267.

6.3.6.2 Содержание пылевидных, илистых и глинистых частиц не должно превышать 2 % по массе. Наличие глины в комках и других засоряющих примесей не допускается выше 0,25 % по массе. Рекомендуется использовать щебень I или II групп по содержанию лещадных зерен.

6.3.6.3 Наибольшая крупность заполнителя выбирается с учетом шага арматурных стержней, конфигурации конструкции, размещения стыков арматурных стержней. Необходимо избегать блокирования частиц заполнителя при протекании бетона через арматуру. Максимальный размер частиц заполнителя, должен быть ограничен до 20 мм.

6.3.6.4 Распределение частиц по размерам, форма частиц крупного заполнителя влияют на показатели расплыва, текучестиипроходимостилитого модифицированногобетона.

6.3.6.5Вкачестве мелкого заполнителя рекомендуется применять кварцевый, кварцево-полевошпатовыйпесокс модулем крупности $М_ф$от1,5 до 3,0 по ГОСТ 8736 и ГОСТ 26633. Допускается использоватьмелкийзаполнительввидесмесииздвухилиболеефракцийпеска.

6.3.6.6 Для снижения вязкости и обеспечения текучести ЛМБ следует использовать пески со сферической (окатанной) формой зерен. Применение песков с игольчатой, оскольчатой формой зерен, а также отсевов дробления нерекомендуется.

6.3.6.7 Рекомендуется использование мелкого заполнителя с содержанием пылевых и глинистых частиц не более 1,5% [13]

6.3.7 Требования кводе

6.3.7.1 Вода для приготовления бетонных смесей должна соответствоватьГОСТ23732. В случае применения повторно используемой воды из технологических процессов бетонного производства, необходимо учитывать тип и количество присутствующих в этой воде твердых частиц, поскольку это может повлиять на однородность смеси от партии кпартии.

6.3.8 Требования кмикронаполнителям.

6.3.8.1 Минеральные добавки (микронаполнители) должны соответствовать требованиям ГОСТ 24211, соответствующим стандартам и техническим условиям на эти продукты.

6.3.8.2 Классификация минеральных добавок по их реакционной способности в составе бетонной смеси по отношению к воде приведена втаблица 1

Таблица 1 - Классификация минеральных добавок по их реакционной способности в составе бетонной смеси по отношению к воде

тип I	инертные	•минеральные наполнители: не активированный минеральный порошок (известняк, доломит и т.д.) в соответствии с ГОСТ Р 52129-2003, пылевидный кварц в соответствии с ГОСТ 9077- 82
тип II	пуццолановые	зола унос в соответствии с ГОСТ 25818 микрокремнезем в соответствии с ТУ5743-048-02495332-96
	гидравлические	гранулированный доменный шлак в соответствии с ГОСТ 3476

6.3.24 Оценка свойств минеральных добавок приведена в таблице 2

Таблица 2 -Оценка свойств минеральных добавокприведена.

	Ориентировочный расход, % от массы цемента	Эффективность	
		Положительный эффект	Сопутствующий эффект
Минеральный порошок	30-50	Минеральный порошок является эффективной добавкой, обеспечивающей увеличение однородности, связности смеси и уменьшение чувствительности к изменению водосодержания.	Увеличение содержания минерального порошка может привести к снижению сохраняемости, значительному повышению вязкости цементного теста, что будет препятствовать способности бетона к расплыву.
Зола-уноса	30-50	Зола-унос является эффективной добавкой, обеспечивающей увеличение связности смеси и уменьшение чувствительности к измененияводосодержания.	Увеличение содержания золы-уноса может привести к значительному повышению вязкости цементного теста, что будет препятствовать способности бетона к расплыву.
Микрокремнезем	10-30	Высокая дисперсность и практически круглая форма микрокремнезема способствует высокой связности смеси и устойчивости к расслоению. Микрокремнеземэффективен в отношенииуменьшенияили устраненияводоотделения.	Возможно сокращение сроков схватывания цементных систем в присутствии микрокремнезема, что может приводить к образованию холодных швов и дефектам на поверхности в случае перерывов в работе и к последующему увеличению трудоемкости обработки верхней поверхности. В этом случае рекомендуется применять совместно с эффективными замедлителями схватывания

Гранулированный доменный шлак(ГДШ)	30-50	Гранулированный доменный шлак (ГДШ) представляет собой реакционно-способный мелкий наполнитель с низкой теплотой гидратации. Способствует снижению расхода цемента	Увеличение содержания ГДШ оказывает влияние на стабильность ЛМБ, что может приводить к уменьшению стойкости в случае изменений технологии (качества сырья) и проблемам, связанным с контролем удобоукладываемост. Замедленное схватывание бетонной смеси увеличивает риск расслоения.

6.4 Химическая добавка

6.4.1Добавка поликарбоксилат в соответствии с ГОСТ 24211.

6.4.2 Химическая добавка применяется для снижения водо-цементного отношения, достижения исконных характеристик по удобоукладываемости, вязкости, расслоению и др. бетонной смеси.

6.4.3 Типы и количество химической добавки в смеси подбирается индивидуально для каждого состава, в зависимости от характеристик сырьевых материалов.

6.4.4 Определение эффективности химической добавки производится по ГОСТ 30459

6.4.5 Порошковые отходы промышленных производств могут быть использованы в составе бетонной смеси после испытаний в составе бетонной смеси при подтверждении всех нормируемых показателей качества и показателей, характеризующих долговечность бетона. Материалы, предназначенные в качестве микронаполнителей при приготовлении ЛБС должны обладать стойкостью к химическому воздействию.

7 Требования кЛМБ

7.1 Требования к бетоннойсмеси (ЛБС)

7.1.1 Бетонные смеси должны удовлетворять требованиям ГОСТ 7473 и настоящего технологического регламента.

7.1.2 Бетонная смесь должна отвечать требованиям технологического регламента, установленным по подвижности, расслаиваемости, объему вовлеченного воздуха, плотности, сохранению этих свойств вовремени.

7.1.3 Показатели качества литой модифицированнойбетонной смесииспользуемой для возведения различных конструкций назначаются в зависимости от степени армирования, формы, геометрических параметров и других конструктивныхособенностей.

7.1.4 Бетонные смеси должны обладать устойчивостью кводоотделению.

7.1.5 Объем вовлеченного воздуха должен соответствовать техническим условиям на изделие.

7.1.6 Если задан класс агрессивности окружающей среды, то бетон должен удовлетворять соответствующим требованиям ГОСТ 31384 или соответствующему стандарту наизделие.Сохраняемостьлитойбетоннойсмеси для монолитных конструкций, возводимых на стройплощадке, назначают в зависимости от условий транспортирования и укладки, но не более 180минут.

7.1.7Литые модифицированные бетонные смеси должны иметь своюмаркировку.

7.1.8Литые бетонные смеси используется при изготовлении железобетонных конструкций в заводских условиях и возведении монолитных конструкций на строительнойплощадке.

7.1.9 Бетонные смеси должны удовлетворять требованиям ГОСТ 7473 и настоящеготехнологического регламента.

7.2 Классификация ЛМБ, используемая при спецификации литого модифицированного бетона

7.2.1Литые модифицированные бетонные смеси характеризуют следующими технологическими показателями качества согласно[7]:

SF1 - SF3 - классы по удобоукладываемости(консистенции), определяемые диаметром расплывастандартногоконуса;

VS1 - VS2 - классы по вязкости, определяемые по времени T_{500}(времени, необ- ходимомудлярасплывастандартногоконуса бетонной смеси до диаметра 500мм);

VF1 - VF2 - классы по вязкости, определяемые временем истечения через V - образнуюворонку;

PA1 - PA2 - классы по способности бетонной смеси преодолевать препятствия, определяемые способностью преодолевать сопротивление арматурных стержней в L - образномящике;

SR1 - SR2 - классы по устойчивости к расслаиванию, определяемые при испы-тании бетонной смеси к расслаиванию с использованиемсита.

7.2.2Взависимости от показателей качества бетонные смеси подразделяют на классы в соответствии с таблицами 3-6[7].

7.2.2.1 Классы ЛМБ по удобоукладываемости

Класс по удобоукладываемости определяется согласно нормативному документу [8]. Смотреть Приложение Б

Таблица 3 - Классы по удобоукладываемости (расплыву конуса)

Класс	Расплыв конуса, мм
SF 1	550-650
SF 2	660-750
SF 3	760-850

7.2.2.2 Классы ЛМБ по вязкости

Класс ЛБС по вязкости определяется временем протекания через V-образную воронку согласно нормативному документу СТ РК EN 12350-11-2018 часть 9 [8]. Смотреть Приложение Б

Таблица 4 - Классы ЛМБ по вязкости

Класс	Время протекания, с
VF 1	≤8
VF 2	9-25

7.2.2.3 Классы ЛМБ по устойчивости к расслаиванию

Класс устойчивости к расслаиванию бетонной смеси (сегрегации) определяется согласно нормативным документам согласно СТ РК EN 12350-11-2018 часть 11 [8]. Смотреть Приложение Б

Таблица 5 - Устойчивость к расслаиванию

Класс	Расслаиваемость, %
SR 1	≤20
SR 2	≤15

7.2.2.4Требования к параметрам, установленным для классов по способности бетонной смеси преодолевать препятствия (L-образная камера) согласно СТ РК EN 12350-11-2018 часть 10, приведены в таблице6.

Таблица 6 - Способность ЛМБ преодолевать препятствия

Класс	Способностьпреодолеватьпрепятствия (PA),
PA1	≥0,8 (с двумяарматурнымистержнями)
PA2	≥0,8 (с тремяарматурнымистержнями)

7.2.3При проведении испытаний различных видов допускается отклонение результатов от данных, приведенных втаблицах выше.

7.2.4При оценке качества литого модифицированногобетона следует использовать критерии соответствия результатов испытания определенному классу в соответствии с данными, приведенными в таблице7.

Таблица 7- Использование классификации бетонных смесей и требований к ним при выборе области применения литых модифицированных бетонов.

Обозначение	Назначение и области применения ЛМБ
Высокоподвижнаябетоннаясмесь	
SF1 (от 550 до 650 мм)	Неармированные или мало армированные бетонные конструкции: плиты перекрытий, облицовки туннелей, фундаментов,сваи
SF2 (от 660 до 750 мм)	Опоры, ростверки, балки пролетных строений, большинство обычных сооружений - колонны, стены
SF3 (от 760 до 850 мм)	Подпорные стенки, заполнение замкнутых форм, вертикальные элементы, густоармированные конструкции сложных форм, торкретирование, конструкции с высокими требованиями к качеству поверхности. Рекомендуется использовать ЛМБ с максимальным размером заполнителя 15 мм
Вязкаябетоннаясмесь	
VS1/VF1 (вязкость менее 8 секунд)	Густоармированные конструкции и изделия, к которым предъявляются высокие требования по качеству поверхности
VS2/VF2 (вязкость от 9 до 25 секунд)	Конструкции и изделия с очень не высокими требованиями к качеству поверхности. Данная смесь имеет лучшую устойчивость расслаиванию
Легкоформуемаябетоннаясмесь	
PA1	Вертикальные сооружения, домостроение, конструкции, армированные с шагом от 80 до 100 мм
PA2	Инженерные сооружения, армированные с шагом от 60 до 80 мм, обделки горных выработок
Устойчивая к расслаиванию бетонная смесь*	
SR1(расслаиваемостьнеболее 20%)	Высотные элементы, за исключением тонких балок, вертикальные сооружения, армированные с шагом до 80 мм. Максимальное расстояние растекания смеси менее 5метров.
SR2(расслаиваемостьнеболее 15%)	Стены и тонкостенные профили, армированные с шагом свыше 80 мм. Максимальное расстояние растекания смеси более 5 метров.

* назначают и контролируют при оценке качества в случаях, когда условия укладки способствуют расслоению: в случае бетонов с высоким классом расплываконусаи/или классом низкой вязкости, или если условия укладки способствуютсегрегации.

8 Требования к бетону из литых модифицированных бетонных смесей

8.1ТребованиякЛМБ, должны соответствовать нормативным документам для промышленных сооружений, установленных проектом, согласованным с Заказчиком.

8.2Проектная организация при разработке проекта применения литого модифицированного бетона устанавливает требования к основным показателям качества бетона, которые указываются в рабочихчертежах:

класс бетона по прочности насжатие В;

класс бетона по прочности на осевое растяжение (принеобходимости) Bt;

марка бетона по морозостойкости,F;

марка бетона по водонепроницаемости,W.

8.3Классы бетона по прочности на сжатие должны отвечать значению гарантируемой нормируемой прочности бетона, МПа, с обеспеченностью0,95 (СНиП 2.03.01-84)

8.4 Особое внимание должно быть уделено назначению требований к бетонам для защитных оболочек, опорных конструкций, каналов, изготовленных в соответствии с требованиямистандарта.

8.5Возрастбетона,отвечающийегоклассупопрочностинасжатиеиосевоера стяжение (проектный возраст), назначают при проектировании в соответствии с указаниями ГОСТ 26633 и 18105. При отсутствии специальных указаний проектный возраст бетона принимают 28 суток.

8.6 Значение отпускной прочности в элементах сборных конструкций следует назначать в соответствии с ГОСТ 18105, 13015 и стандартами на конструкции конкретныхвидов.

8.7 Для литых модифицированныхбетонов защитных оболочек и других предварительно напряженных конструкций должны быть определены деформационные характеристики (показатели ползучести,усадки).

8.8 Значения предельных относительных деформаций из литых модифицированных бетонов принимают в соответствии с требованиями СП63.13330.

8.9 Значения начального модуля упругости при сжатии и растяжении следует определять экспериментально. Его величина должна быть сопоставлена со значениями начального модуля упругости обычного вибрационного бетона, указанными в СП 63.13330 «Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры» и учитываться при проектировании конструкций. Для ориентировочных расчетов допускается принимать значение модуля упругости по СП63.13330.

8.10Плотность тяжелого литого модифицированногобетонаможетнаходиться в пределах от 2200 до 2600кг/м^3.

8.11Тепловыделение литых модифицированныхбетонов при использовании химических добавок на основе поликарбоксилатов не должнопревышать тепловыделения обычных вибрационных бетонов и определяется согласно ГОСТ 24316.

8.12Водонепроницаемостьлитых модифицированных бетонов, приготовленных с использованием добавок поликарбоксилатовдолжнасоответствовать значениям водонепроницаемости вибрационных бетонов тех жеклассов,либо специальным требованиям к конструкции определяется по ГОСТ 12730.5.

8.13Морозостойкость литых модифицированных бетонов определяется качеством применяемых материалов, водоцементным отношением и наличием в структуре системы условно-замкнутых пор. Влияние микронаполнителейихимических добавок на морозостойкость литого модифицированногобетона определяется их влиянием на поровую структурубетона. Морозостойкость определяется по ГОСТ 10060.

9 Требование к производству работ и потребность в механизмах

9.1 Технология приготовления литых модифицированныхбетонныхсмесей

9.1.1Литые модифицированные бетонные смеси для строительных конструкций следует изготавливать в соответствии с требованиями СП 70.13330, [9], [10] настоящего технологического регламента, а также требованиями технологической документации на конструкции и сооружения конкретных видов, утвержденной в установленномпорядке.

9.1.2 Производство литых модифицированных бетонных смесей необходимо осуществлять на бетонных заводах, оснащенных системой обеспечения качества материалов, операций и оборудования в соответствии с требованиями ГОСТ 7473, ГОСТ 18105, ГОСТ26633.

9.1.3 Необходимо, чтобы весь персонал, участвующий в производстве, транспортировке и укладке ЛМБ и был ознакомлен с положением настоящего регламента получил необходимую подготовку от специалиста с опытом работы сЛБС.

9.1.4 Заполнители должны храниться на площадках с твердым покрытием или закрытых складах, чтобы исключить перемешивание различных фракций и типов. Рекомендуется защищать заполнители от попадания воды. При производстве бетона в зимних условиях склады заполнителей должны быть закрытыми итеплыми.

9.1.5 Правила хранения цемента, заполнителей, химических и минеральных добавок должны соответствовать СП43.13330.

9.1.6 Приготовление ЛМБ должно осуществляться с использованием стационарных или передвижных (мобильных) бетоносмесительных установках с гравитационным или принудительным перемешиванием смеси в соответствии с требованием ГОСТ 7473. Бетоносмесительные установки должны соответствовать требованиям ГОСТ27338.

9.1.7 Продолжительность перемешивания литой модифицированной бетонной смеси рекомендуется увеличить на 25% по сравнению с продолжительностью перемешивания обычной бетонной смеси (таблицей8).

Таблица 8 - Продолжительность перемешивания ЛБС на плотных заполнителях.

Объём смесителя, л	Продолжительность перемешивания, сек			
	в гравитационных смесителях	в смесителях принудительного действия при водоцементном отношении, В/Ц		
		менее 0,3	от 0,3 до 0,4	более 0,4
Менее 750,0	100	120	80	70
От 750,0 до 1500,0	150	135	90	75

Более 1500,0	200	150	100	80

9.1.8Дозирование плотных компонентов бетонной смеси должно осуществляться по массе. Пористые заполнители следует дозировать по объему с коррекцией по массе. Точность дозирования материалов (цемент, заполнители, минеральные и химические добавки, вода) для приготовления бетонной смеси должна соответствовать ГОСТ7473:

9.1.9Приготовление бетонных смесей консистенции SF1, SF2 рекомендуется производить в смесителях принудительного перемешивания с лопастнымимешалками.

9.1.10При приготовлении бетонных смесей консистенции SF3 допускается использование гравитационных смесителей. При использовании смесителей принудительного перемешивания в начале в смеситель дозируют заполнители совместно с цементом и минеральными добавками (микронаполнителями), затем вводят основную часть воды затворения и суперпластификатор. Добавки, регулирующие вязкость, вводят с последней порцией воды. Использование смесителей с принудительным перемешиванием позволяет получить большую подвижность смеси и уменьшить расход суперпластификатора по сравнению с гравитационнымисмесителями.

9.1.11Рекомендуется при использовании гравитационных смесителей сначала в смеситель дозируется примерно две трети воды от общего количества. Затем следует ввести заполнители, минеральные добавки (микронаполнители) и цемент. После получения однородной смеси добавляют оставшуюся воду и суперпластификатор. Добавки, регулирующие вязкость, вводят послепластификаторов.

9.1.12При приготовлении литой модифицированной бетонной смеси следует соблюдать последовательность введения компонентов. Оптимальная последовательность введения компонентов определяется путем проведения производственных испытаний. Чаще всего сначала добавляется заполнитель совместно с цементом и минеральными добавками (микронаполнителями), после чего вводится основное количество воды затворения и суперпластификатор.

Добавки, регулирующие вязкость, вводят с последней порцией воды. Использование смесителей с принудительным перемешиванием позволяет получить большую подвижность смеси и уменьшить расход суперпластификатора по сравнению с гравитационными смесителями.

Добавки не следует смешивать друг с другом до момента дозирования, если нет четких рекомендаций по этому вопросу от производителя добавки.

Примечания:

1. В зимних условиях рекомендуется подавать горячую воду (не более 70 °С) на заполнители, после чего добавлять цемент и добавки.

2. Рекомендуется при приготовлении бетонной смеси цемент подавать в смеситель в последнюю очередь, чтобы избежать контакта с горячей водой.

9.1.13До начала производства рекомендуется произвести пробный выпуск бетонной смеси для определения последовательности загрузки и оценки качества бетонной смеси. В процессе испытаний необходимо выработать стандартную процедуру дозирования и смешивания компонентов и соблюдать ее в дальнейшем, для того чтобы качество бетонной смеси не отличалось от партии к партии. Объем бетона для производственных испытаний должен быть не меньше половины емкостисмесителя.

9.1.14При подтверждении качества получаемой бетонной смеси компоненты бетонной смеси в работающий смеситель допускается загружатьодновременно.

9.1.15Температура цемента, заполнителей, минеральной добавки не должна превышать 70ºС.

9.1.16Рекомендуется обеспечить временной интервал между производством цемента и его применением не менее 14 дней. Температура воды при приготовлении бетонной смеси не должнапревышать:

70ºС при приготовлении бетонной смеси на нормальнотвердеющем цементе по ГОСТ 31108 (ЦЕМ(Н);

60ºС при приготовлении бетонной смеси на быстротвердеющем цементе по ГОСТ 31108 (ЦЕМ(Б).

9.1.17В зимний период приготовление бетонной смеси следует производить в обогреваемых бетоносмесительных установках с использованием подогретой воды, оттаявших или подогретых заполнителях. Приготовление бетонной смеси в зимний период рекомендуется с использованием смесителей с принудительным перемешиванием. Продолжительность перемешивания бетонной смеси рекомендуется увеличить на 25 %. Способы и средства транспортировки должны обеспечивать доставку бетонной смеси к месту укладки с нормируемыми показателями качества и температурой не ниже требуемой по расчету.

9.1.18При приготовлении бетонной смеси в зимний период последовательность загрузки должна бытьследующей:

а) при использовании горячей воды:

заполнитель;

минеральная добавка;

горячаявода;

цемент;

химическаядобавка;

б) при использовании подогретых заполнителей:

1) мелкий заполнитель; 2)цемент;

минеральная добавка;

крупный заполнитель;

вода, химическаядобавка.

9.1.19При приготовлении бетонной смеси на плотных заполнителях рабочий раствор химической добавки вводят вместе с водой затворения или с частью воды затворения.

9.1.20Продолжительность перемешивания должна обеспечивать получение бетонной смеси и бетона в соответствии назначенными требованиями и должна соответствовать ГОСТ 7473.

9.1.21Производительность завода, время транспортировки и скорость укладки на месте производства работ должны быть скоординированы с целью исключения перерывов в поставке, для того чтобы бетонная смесь сохранила требуемую подвижность к моменту укладки. Перерывы в производстве могут привести к образованию швов бетонирования между слоями явиться причиной недоуплотнения последующих слоев бетонной смеси при возобновлениипроизводства.

9.2 Транспортирование литой бетоннойсмеси

9.2.1Транспортировку ЛБС следует осуществлять автобетоносмесителями в соответствии с ГОСТ 7473 и ГОСТ 27339. Конструкция автобетоносмесителя должна обеспечивать побуждение готовой бетонной смеси в процессе ее транспортировки, транспортирование бетонной смеси с сохранением ее качества, обеспечивать разгрузку готовой бетонной смеси непосредственно в место укладки или перегружать в другие бетонотранспортные устройства: бетононасосы, конвейеры, тару ит.п.

9.2.2Выбор автобетоносмесителя должен производиться с учетом максимального использования по загрузке. Коэффициент загрузки автобетоносмесителя при транспортировке ЛМБ рекомендуется принимать не менее0,4.

9.2.3Соотношение геометрического объема и вместимости автобетоносмесителя приведено в таблице 9.

Наименованиепоказателя	Значениепоказателя					
Геометрический объем, $м^3$, не более	8	9	10	12	14	16,5
Вместимость, $м^3$	4	5	6	7	8	10

9.2.4Не допускается транспортирование литых модифицированных бетонных смесей автосамосвалами (только полуфабрикат).

9.2.5Не рекомендуется транспортировать готовую бетонную смесь ЛМБ на расстояние более 50 км.

9.2.6Продолжительность транспортирования готовой бетонной смеси не должна быть более времени сохраняемостиеесвойств.

9.2.7Время транспортирования готовых бетонных смесей недолжно превышать 2 ч.

9.2.8При транспортировании бетонной смеси необходимо исключить возможность прямого воздействия атмосферных осадков, ветра и солнечных

лучей, нарушение состава бетонной смеси, расслоения, потери цементного раствора.

9.2.9В зимних условиях готовую бетонную смесь рекомендуется перевозить в авто бетоносмесителями с утепленными барабанами. Продолжительность транспортирования готовой бетонной смеси должна устанавливаться с учетом темпа остывания.

9.2.10После загрузки бетонной смеси в автобетоносмеситель и до его полной разгрузки необходимо обеспечить постоянное вращение барабана миксера на малых или средних оборотах (во избежание самоуплотнения смеси вмиксере).

9.3 Технология бетонирования

9.3.1Укладку литой модифицированной бетонной смеси производят в соответствии с правилами СП 70.13330 и настоящим технологическим регламентом. Способ подачи бетонной смеси будет определяться по расчетному значению интенсивности бетонирования. Выбор способа укладки бетонной смеси осуществляется с учетом геометрии и степени армирования конструкции, свойств бетоннойсмеси.

9.3.2Выбор бетоноукладочного комплекса осуществляется с учетом вида бетонируемой конструкции, ситуационных условий стройплощадки, сроков производства работ, среднего и пикового темпа бетонирования, климатическихусловий.

9.3.3Разработка технологического регламента бетонирования осуществляется на основании выбранного бетоноукладочного комплекса и определенных требований к бетонной смеси по технологическим характеристикам с учетом сырьевой базы района строительства.

9.3.4Выбор типа опалубки должен производиться с учетом вида конструкций и условий производства работ.

9.3.5Применяемая опалубка, формообразующие, несущие. соединительные и под-держивающие элементы опалубки должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 52085. Правильность установки, сборки, закрепления опалубки и поддерживающих частей, лесов должны быть приняты в соответствии с СП 70.13330, СНиП 12-03 и СНиП 12-04. Расчет опалубки для бетонирования ЛМБ должен учитывать полное гидростатическое давление бетона на опалубку. Конструкция опалубки должна исключать вытекание цементного молочка и раствора. Метод расчета опалубки для ЛБС приведен в ПриложенииВ.

9.3.6Опалубочные работы следует проводить в соответствии с СП70.13330.

9.3.7Перед укладкой смеси следует убедиться, что арматура и опалубка размещены в соответствии с требованиями проекта, а опалубка не содержит воды, мусора, достаточно герметизирована и принята поакту.

9.3.8Перед укладкой бетонной смеси необходимо определить интенсивность подачи её в опалубку с учетом густоты армирования,

технологических свойств бетонной смеси и возможности вовлечения дополнительноговоздуха.

9.3.9Разгрузку бетонной смеси не следует начинать до проведения контрольных проверок, включающих визуальный контроль, а также соответствие показателей качества бетонной смеси требованиям проекта и Технологическогорегламента.

9.3.10Запрещается добавлять в бетонную смесь воду для увеличения подвижности бетонной смеси и восстановления удобоукладываемости и других нормируемых показателей качества ЛБС, а также введение добавок на местеукладки.

9.3.11Бетонную смесь можно укладывать путем прямой разгрузки в конструкцию по бетонолитному желобу из автобетоносмесителя, с помощью автобетононасоса, бадьи. Рекомендации по выбору способа бетонирования, применяемого оборудования для бетонирования различных конструкций приведены в Приложении Е. Принятый способ укладки бетонной смеси должен обеспечивать монолитностьконструкции.

9.3.12При вынужденных перерывах бетонирования или необходимости выдерживания смеси на стройплощадке в течение определенного времени до укладки, то можно использовать приемные бункеры - танки, оборудованные мешалками или автобетоносмесители.

9.3.13При укладке бетонной смеси с помощью автобетононасоса конец бетоновода должен находиться на минимально близком расстоянии к поверхности бетона. В случаях, когда требования к качеству поверхности очень высокие, ЛМБ следует укладывать с помощью погружного шланга. Укладку рекомендуется начинать с наиболее низкой части конструкции, в месте, в котором шланг можно расположить как можно ближе к нижней части опалубки. После образования достаточной глубины раствора шланг необходимо погрузить в бетон. Конец шланга следует, по возможности, все время поддерживать ниже уровня поверхности бетона для избежания попадания воздуха вшланг.

9.3.14При укладке бетонная смесь должна перемещаться равномерным слоем под малым углом скольжения и полностью охватывать стержни арматуры без образования раковин. При бетонировании конструкций из ЛМБ не должно выделяться воздушных пузырей, что может свидетельствовать о нарушении состава бетона или технологии укладки.

9.3.15В зависимости от размеров конструкции, высоты сброса бетона, густоты армирования, необходимо предусматривать технологические отверстия для подачи бетоновода для избежания расслоения бетонной смеси при ударе обарматуру.

9.3.16При использовании бетононасоса должна быть осуществлена его «прокачка» цементным раствором, специальными «пусковыми смесями». Допускается прокачка насоса бетонной смесью ЛМБ с последующим возвратом бетонной смеси в автобетоносмеситель.

9.3.17Следует правильно подобрать длину потока растекающейся смеси. При этом необходимо учитывать, что длина потока более 10 м может привести к динамическому расслоению смеси или к образованиюпустот.

9.3.18Быстрый вертикальный поток смеси при бетонировании может привести к задержке выхода воздуха из уложенной смеси, а также к образованию воздушных пузырьков и пор наповерхности.

9.3.19Перед началом бетонирования при приемке бетонной смеси строительной лабораторией должно быть проведено испытание на подвижность по расплыву конуса для определения показателейсмеси.

9.3.20Следует обеспечить постоянное наблюдение за укладкой бетонной смеси, при этом контролировать эффективность заполнения формы (опалубки) и любые признаки расслаивания, а также блокировки смеси стержнями арматуры, элементами опалубки. Визуальная оценка любого признака расслаиваемости - отделения раствора/цементного теста/воды по границе расплыва и любое отделение заполнителя в центральной зоне указывает на недостаточную степень устойчивости расслаиванию.

9.3.21Смеси ЛМБ, отличающиеся низкой скоростью истечения (продолжительность времени расплыва $T_{500} \geq 20$ сек), могут проявлять склонность к тиксотропному гелеобразованию, которое вызывает начало процесса уплотнения и схватывания в момент покоя. Для исключения тиксотропного гелеобразования необходимо постоянное перемешивание бетонной смеси при транспортировании её на стройплощадку и передукладкой.

9.3.22Укладку следует производить без перерывов. Размещение бетонолитых труб, бетоноводов, мест подачи бетонной смеси следует расположить таким образом, чтобы кромка бетонной смеси все время находилась вдвижении.

9.3.23Если произошел перерыв в бетонировании при вертикальной подаче бетона, рекомендуется несколько увеличить высоты сброса очередной порции бетонной смеси, так, чтобы поверхность первого слоя «оживилась», что позволит избежатьобразование«холодного» шва.

9.3.25Максимальная высота сброса ЛМБ SF1-SF3 составляет 1,0м.

9.3.26При бетонировании массивных конструкций и больших площадей, где по условиям производства работ допускается бетонирование захватками с образованием рабочих швов бетонирования, следует использовать металлическую сетку с размером ячейки до3мм.

9.3.27 При использовании бетононасосов литую модифицированную бетонную смесь целесообразноподаватьнепосредственноотоснованияопалубкиснизувверх(напорное заполнение опалубки восходящим потоком бетонной смеси). При этом в бетонную смесь вовлекается меньше воздуха, обеспечивается технологичность укладки и высокое качество поверхности. Скорость бетонирования выше, чем при подаче смеси сверху. При бетонировании от основания рекомендуется

использовать задвижку на бетононасосе для регулирования объема подаваемой смеси.

9.3.28 При бетонировании с помощью бетонолитной трубы, лотка или секций бетоноводов место выхода бетона должно быть направлено в самую дальнюю зону бетонирования и отводиться по мере продвижения фронтаработ.

9.3.29 При бетонировании с использованием бадьи необходимо обеспечить герметичность бадьи и не допускать вытекание раствора или цементноготеста.

9.3.30 Бадью для транспортирования бетонной смеси не следует подвергать вибрации и чрезмерному встряхиванию при подаче бетонной смеси во избежание расслаивания бетоннойсмеси.

9.3.31 Организация работ должна исключать длительный застой смеси в бадье, что может вызвать тиксотропное схватывание, из-за которого при открытии бадьи во время разгрузки смесь не будет вытекать плавно исамостоятельно.

9.3.32 При необходимости для ликвидации тиксотропного схватывания следует произвести побуждение бетонной смеси с помощью внешнего вибрационного воздействия.

9.3.33Низкая интенсивность подачи бетонной смеси с помощью бадьи (12-20 $м^3$/час) может вызвать образование поверхностной корки, а также появление видимого горизонтального следа или шва бетонирования между слоямибетона.

9.3.34При бетонировании высоких или тонких стен укладку бетонной смеси следует производить через бетоновод для подводного бетонирования или сжимающийся рукав (сплющивающийся шланг), прикрепленный к бадье. Использование сжимающегося рукава вместо жесткого шланга обеспечивает наполненность рукава по всей длине, регулирует скорость движения и предотвращает вовлечение воздуха в бетонную смесь. Если используется жесткий бетоновод для подводного бетонирования, его конец следует всегда держать глубже поверхности бетоннойсмеси.

9.3.35При укладке бетонной смеси ЛМБ вибрирование не допускается, за исключением следующихслучаев:

при защемлении воздуха в замкнутой частиопалубке;

-при перерыве в укладке бетонной смеси в случае опасности образования шва бетонирования;

-при признаках расслоения смеси при бетонировании плоскостных конструкций для выравнивания поверхности плит.

9.3.36Обработку поверхностей следует производить сразу после разравнивания бетонной смеси до начала тиксотропного схватывания и до высыхания поверхности (образования корки).

9.3.37Перечень возможных причин дефектов и способов их предотвращения или устранения приведен в ПриложенииД.

10 Правила приемки бетонныхсмесей

10.1Бетонные смеси должны быть приняты техническим контролем изготовителя в соответствии с требованиями ГОСТ 7473 и настоящего регламента. Периодичность контроля показателей качества бетона и бетонных смесей устанавливают в соответствии с ГОСТ7473.

10.2Качество литой модифицированнойбетонной смеси на заводе-изготовителе оценивается по следующимхарактеристикам:

подвижность по расплывуконуса;

вязкость (V-образная воронка илиT_{500});

сохраняемость (стабильность подвижности вовремени);

средняяплотность;

устойчивость красслаиванию;

объем вовлеченноговоздуха;

температура.

10.3Качество бетона оценивается по показателям прочности в проектном возрасте и другим нормируемым показателям качества, определенным в договоре на поставку бетоннойсмеси.

10.4Контроль качества и оценка соответствия бетонной смеси и бетона заданным требованиям для сборного железобетона производят на бетоносмесительном узле и/или на заводе сборного железобетона, а для монолитного бетона - на заводе изготовителе бетоннойсмеси.

10.5При приемке бетонной смеси в журнале производства работ должно быть отмечено:

время доставки бетонной смеси настройплощадку;

подвижность бетоннойсмеси.

10.6Приемка бетонной смеси на объекте строительства осуществляется представителем приобъектнойлаборатории или представителем организации, осуществляющей строительныйконтроль.

10.7Определение подвижности бетонной смеси по расплывуконуса производится путем отбора проб из каждого бетоносмесителяв начальный период поставки из 5 первых бетоносмесителейи в дальнейшем из каждого 50-го бетоносмесителяпри поставке одного класса бетона и одной подвижности. Отбор пробы для определения расплываконуса осуществляется после выхода 0,1 $м^3$бетоннойсмеси.

11 Выдерживание и уход забетоном

11.1 Выдерживание литого модифицированногобетона в конструкциях осуществляется аналогично выдерживанию вибрационного бетона с соблюдением требований по тепловой изоляции и допустимым перепадам температур при снятии опалубки и прекращении ухода забетоном.

11.2 Комплекс других работ при выдерживании бетона определяется требованиями технологических регламентов на производство бетонных работ при возведении монолитных и изготовлении сборных железобетонныхконструкций.

11.3 Уход за бетоном должен обеспечивать достижение бетоном всех нормируемых показателей качества в проектномвозрасте.

11.4 При выдерживании и уходе за бетоном рекомендуется применять пленкообразующие материалы по уходу за бетоном. Пленкообразующие материалы распределяют с помощью пневматического инструмента, краскопультов, удочек с расходом, рекомендуемым производителем материала. Необходимо обеспечить равномерное распределение пленкообразующего материала по поверхности слоем толщиной около 0, 3-0,5 мм и формирование качественного пленочного покрытия. Запрещается наносить пленкообразующие материалы на поверхности бетона, которые в дальнейшем будут находиться в монолитном контакте с бетоном, а также на элементы стыков, если сформировавшаяся пленка не может быть полностью удалена перед последующими бетоннымиработами.

11.5 Не допускается нарушать сплошностьсформированного пленкообразующего покрытия на бетоне до набора им 70% марочнойпрочности.

11.6 При невозможности ухода с помощью пленкообразующего материала на отдельных участках конструкции необходимо обеспечить влажностный уход с помощью, увлажняемой мешковины, нетканых синтетических материалов или постоянного орошения водой. Разница между температурой поверхности бетона и температурой воды не должна превышать10ºС.

11.7 При появлении трещин вследствие пластической усадки допускается повторная обработка поверхности с помощью гладилок или легкихвиброреек.

11.8 Мероприятия по уходу за бетоном фиксируют в журнале ухода забетоном.

11.9 При среднесуточной температуре наружного воздуха ниже 5 °Си минимальной суточной температуре ниже 0°С необходимо принимать специальные меры по выдерживанию уложенного бетона в конструкциях и сооружениях, бетонируемых на открытом воздухе согласно СП 70.13330.2012

12 Контроль качества материалов при приготовлениИЛМБ

12.1Контроль качества сырьевых материалов при производственном контроле на заводе товарного бетонапредусматривает:

документальный контроль всех материалов (сравнение результатов приемосдаточного контроля, обозначенных в документе о качестве, с требованиями соответствующих нормативных документов);

экспериментальный контроль: заполнители, микронаполнители – гранулометрический состав, цемент – сроки схватывания, нормальная густота цементного теста, признаки ложного схватывания.

добавки - визуальный контроль внешнего вида, контроль плотности рабочих растворов.

12.2Испытания щебня проводят по ГОСТ 8269, оценку качества щебня по ГОСТ 8267 и ГОСТ26633.

12.3Испытания песка проводят по ГОСТ 8735, оценку качества песка по ГОСТ 8736 и ГОСТ 26633. Испытания цемента проводят по ГОСТ 310, оценку качества проводят по ГОСТ 31108,30515.

13 Безопасность труда при производстве работ сЛМБ

При производстве бетонных смесей, изготовлении сборных железобетонных изделий и бетонировании монолитных конструкций следует руководствоваться общими требованиями безопасности в соответствии с СНиП12-03-99.

Цемент, микронаполнители, заполнители для бетона - вещества пожаровзрывобезопасные.Цемент-веществомалоопасное4-гоклассаопасностипоГОСТ

12.1.007. Предельно допустимая концентрация (ПДК) воздушной зоны производственных помещений - 6 мг/куб.м.

Минеральные компоненты бетона - вещества малоопасные. ПДК в воздухе рабочей зоны производственных помещений для кварцевого песка - 1 мг/куб.м, для мине- ральных добавок - 5 мг/куб.м.

Производственные помещения, где производятся работы по приготовлению бетонных смесей, должны быть оборудованы общеобменной приточно-вытяжной вентиляцией по ГОСТ 12.04.021, оборудование не должно допускать пылеобразования в воздухе рабочей зоны, в том числе при погрузочно-разгрузочныхработах.

Вращающиеся части оборудования для приготовления, транспортирования и укладки бетонной смеси должны иметь соответствующие защитные ограждения. Перед включением привода бетоносмесителя необходимо убедиться в отсутствии людей в рабочей зоне. К работе допускаются лица, ознакомленные с требованиями безопасности и после проведения соответствующегоинструктажа.

Персонал, занятый на приготовлении бетонных смесей и на строительной площадке, должен проходить предварительный и периодические медицинские осмотры в соответствии с приказом Минздрава N 555 от 29.09.1989г.

При подготовке участка бетонирования на верхней отметке должны быть размещены деревянные настилы (трапы), расположение которых соответствует порядку бетонирования.

Зона бетонирования, проезды и места разгрузки и разворота автобетоносмесителей должна быть освещена прожекторами или переносными осветительными лампами для улучшения условий труда и облегчения визуального контроля при транспортировке, подачей бетонной смеси, за качеством укладки и уплотнения бетонной смеси в темное времясуток.

При работе с электрооборудованием в т.ч., используемом при прогреве бетона, следует соблюдать правила электробезопасности в соответствии с СНиП 12-03-99 и ПУЭ.

Приложение А
Примеры применяемых в международной практике составов ЛМБ

Таблица В1 – Примеры применяемых в международной практике составов ЛМБ

Страны	Компонент ЛМБ	Единица измерения	Расход составляющих на1 $м^3$бетонной смеси
1	2	3	4
Япония	Портландцемент с пониженнымтепловыделением	кг	530,0
	Вода	л	175,0
	Зола	кг	70,0
	Мелкий заполнитель	кг	751,0
	Крупный заполнитель	кг	789,0
	Химическая добавка (суперпластификатор)	кг	9,0
Европейский союз	Портландцемент	кг	280,0
	Вода	кг	245,0
	Известковый наполнитель	кг	190,0
	Мелкий заполнитель	кг	865,0
	Крупный заполнитель	кг	750,0
	Химическая добавка (суперпластификатор)	кг	4,2
США	Портландцемент	кг	357,0
	Вода	кг	180,0
	Гранулированный шлак	кг	119,0
	Мелкий заполнитель	кг	936,0
	Крупный заполнитель	кг	684,0
	Химическая добавка (суперпластификатор)	мл	2500,0
Индия	Цемент	кг	330,0
	Вода	кг	163,0
	Зола высококальциевая	кг	150,0
	Крупный заполнитель	кг	309
	Крупный заполнитель	кг	455
	Мелкий заполнитель	кг	917
	Химическаядобавка (суперпластификатор)	мл	2400,0
Россия Состав №1	Цемент	кг	250.0-300.0
	Минеральные добавки (пыль известняка или зольные отходы	кг	80,0-100,0

		Мелкофракционные материалы(≤ 0,125 мм)	кг	>500,0
		Песок	% от общей массы инертных материалов	53,0
		Щебень фракции 5-10 мм		15,0
		Щебень фракции 15-20 мм		32,0
		Вода	л	около 180,0
		Химические добавки (пластификатор)	%	около 1,0
	Состав [16]	Цемент	кг	350
		Зольная пыль или молотый известняк	кг	200
		Вода	кг/м^3	170-180
		Водоцементное отношение	кг/м^3	0,49-0,51
		Песок (зернистость 0-2)	кг/м^3	650
		Мелкий щебень (2-16)	кг/м^3	950
		Пластификатор	кг/м^3	2-4

Составы разработанные ТОО «ЛМБ2022» с добавкой AR122

№ составов	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Цемент, кг	490	475	410	420	450	450	450
Песок, кг	944	967	870	870	944	944	944
Щебень (5-10), кг	632	647	900	900	632	632	632
Щебень (10-20), кг	178	183	-	-	178	178	178
Микро-кремнезем, кг	-	-	40	40	40	40	40
Добавка, кг	3,1%	3,1%	1,7%	1,7%	1,5%	1,5%	1,5%
Вода, л	188	185	180	170	190	190	190
Плотность, кг/м^3	2252	2203	2140	2247	2366	2354	2330
Текучесть, сек	-	-	9,95	12,66	13,62	16,33	10,47
Расплыв, см	67	66	55	63-67	48-49	68-69	51-52
Предел прочности при сжатии возрасте 3 суток, МПа	12,64	15,32	20,76	22,83	26,91	28,47	20,39
Предел прочности при сжатии возрасте 7 суток, МПа	18,40	22,94	33,0	36,12	31,77	42,35	38,76
Предел прочности при сжатии возрасте 28 суток, МПа	22,17	33,45	45,15	51,73	57,05	68,25	54,05
Средняя плотность, кг/м³	2297	2272	2218	2370	2393	2390	2362
Примечание	однородные смеси, расслоения не наблюдалось						

Приложение Б
(обязательное)

Методы испытаний

1 Методика определения удобоукладываемости и скорости расплывалитой модифицированной бетонной смеси (расплыва конуса и времени T_{500})

Удобоукладываемостьлитой бетонной смеси оценивают по расплыву конуса (РК), отформованного из смеси, в соответствии с BS EN 12350-8:2010 [11], ГОСТ 10181. Время T_{500} является мерой скорости расплыва и вязкости.

1.1 Средства контроля и вспомогательное оборудование

Для определения подвижности бетонной смеси применяют:

-конус нормальный или увеличенный (рисунок А.1);

-линейку стальную по ГОСТ 427;

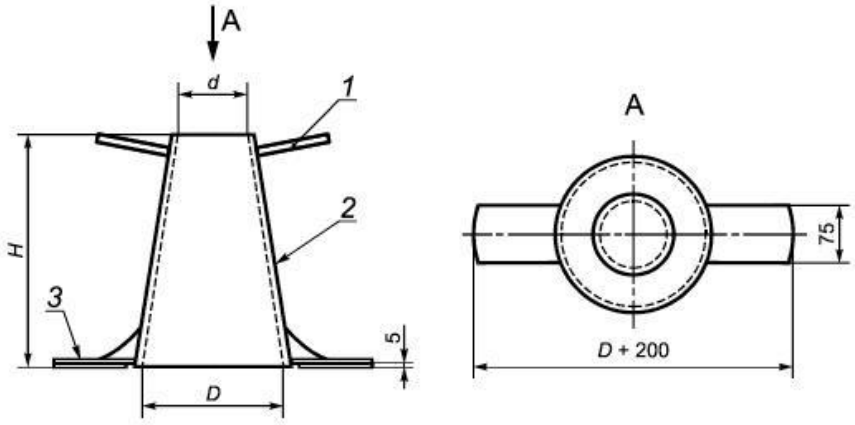
-кельму типа КБ по ГОСТ 9533;

-воронку загрузочную;

-секундомер, с пределом измерений до 0,1 сек.;

-металлический лист размерами не менее 900х900 мм (рисунок А.2);

-утяжелительное кольцо (необязательно), массой, не менее, 9 кг (позволяет проводить испытание 1 человеку).



1 – ручка; 2 – корпус; 3 – упоры

Рисунок А.1 – Конус для определения подвижности

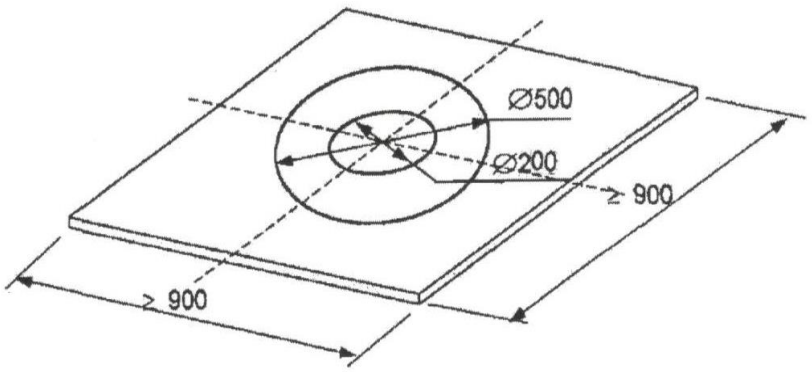


Рисунок А.2 – Металлический лист

Металлический лист представляет собой плоскую пластину размерами не менее 900х900 мм, толщиной не менее 2 мм. Поверхность листа должна быть неабсорбирующей, стойкой к воздействию бетона и к коррозии. Конструкция пластины не должна допускать искривления в процессе эксплуатации. Отклонение от плоскостности не должно превышать 3 мм в любой точке металлического листа, при установке поверочной линейки по центру противоположных сторон.

Центр пластины размечают двумя пересекающимися линиями, расположенными параллельно краям пластины, и двумя окружностями диаметром 200 и 500 мм, центры которых совпадают с центром пластины (рисунок А.2).

Испытание по расплыву конуса представлено на рисунке А.3

1.2 Порядок подготовки и проведения испытаний

1.2.1 Подготовить образцы, конус и металлический лист в соответствии с ГОСТ 10181.

1.2.2 Установить конус на лист, совместив с малой окружностью,и удерживать его в этом положении (или используя утяжелительное кольцо). Не допускается утечка цементного молока из-под конуса.

1.2.3 Заполнить конус свежеприготовленной бетонной смесью таким же образом, как и при испытании бетонной смеси на осадку конуса в соответствии с ГОСТ 10181, только без штыкования или вибрирования. Время с момента заполнения конуса до проведения испытания не должно превышать 30 секунд. В течение этого времени необходимо удалить излишки бетона с вершины конуса и убедиться, что на поверхности листа отсутствуют остатки бетона и подтеки воды.

Рисунок А3 – Испытание литой модифицированной бетонной смеси методом расплыва конуса и определение времени T_{500}

1.2.4 Одним движением по направлению вверх снять конус, не препятствуя расплыву бетонной смеси.

1.2.5 Если необходимо определить время T_{500} (время, измеряемое от подъема конуса вверх до достижения смесью диаметра расплыва 500 мм), то следует использовать секундомер и зафиксировать время с точностью до 0,1 сек, в момент, когда бетон в любой точке достигнет диаметра окружности 500 мм. По окончании растекания бетонной смеси необходимо измерить максимальный диаметр расплыва в диаметрально противоположных направлениях и зафиксировать это значение с точностью до 10 мм.

1.2.6 Визуально проверяют наличие расслоения бетонной смеси. Цементное тесто/раствор может отделяться от крупного заполнителя, образуя окружность, выходящую на несколько миллиметров за границу крупного заполнителя. Также отделение цементного теста/раствора от крупного заполнителя можно наблюдать и в центре бетонной смеси. В случае наличия признаков расслоения, испытание нельзя считать удовлетворительным.

1.3 Правила обработки результатов испытаний

1.3.1Расплыв конуса литой модифицированной бетонной смеси определяют дважды. Общее время испытания с начала заполнения конуса бетонной смесью при первом определении и до момента измерения расплыва конуса при втором определении не должно превышать 10 минут.

1.1.3.2Расплыв конуса бетонной смеси вычисляют с округлением до 10 мм, как среднеарифметическое значение результатов двух определений расплыва конуса из одной пробы, отличающихся между собой не более чем на 30 мм. При большем расхождении результатов определение повторяют на новой пробе.

1.3.3 Время T_{500} измеряется с точностью до 0,1 секунды.

1.5 Обработка результатов испытания

1.5.1 Значение расплыва конуса - это среднее значение результатов двух диаметрально противоположных измерений, выраженное с точностью до 10мм.

1.5.2 Время T_{500} измеряется с точностью до 0,1 сек.

1.5.3 Отчет об испытании должен включать:

Маркировкуобразца;

Место проведенияиспытаний;

Дату проведенияиспытаний;

Значение расплыва с точностью до 10мм;

Указание признаковрасслоения бетона;

Время с момента окончания перемешивания и проведенияиспытаний;

Указания отклонений от последовательности проведения испытаний, указанной в этомдокументе.

1.5.4 Этот отчет также может включать:

Указание времени T_{500} с точностью до 0,1с;

Значение температуры бетона в моментиспытания;

Время, затраченное дляиспытаний.

2 Испытание бетонной смеси V-funneltest

2.1 Общиеположения

2.1.1 V- funneltest применяется для оценки вязкости литого модифицированного бетона и его удобоукладываемости.

2.1.2 Испытание основано на определении времени истечения из V-воронки для ЛМБ. Это испытание не рекомендуется проводить, если максимальный размер фракции заполнителя превышает 20 мм.

2.1.3 Принцип испытания заключается в том, что V – образная воронка заполняется бетонной смесью, после чего определяется время, за которое бетонная смесь вытечет из воронки. Это время обозначается как время истечения V-воронки.

2.2 Средства контроля и вспомогательное оборудование

2.2.1 V-образная воронка, имеет размеры, приведенные на рисунке Б.2 (допуски соответствуют ± 1 мм). Основание воронки оборудовано быстросъемной герметичной заслонкой и опорой, обеспечивающей горизонтальное положение воронки. Воронка должна быть изготовлена из металла; иметь гладкую поверхность, быть стойкой к воздействию бетона и не ржаветь впроцессеэксплуатации.

2.2.2 Емкость, для хранения бетонной смеси должна иметь объем не менее 12

литров и достаточной для проведения испытаний.

2.2.3 Секундомер, с точностью измерений до 0,1 сек.

2.2.4 Правило, для выравнивания уровня бетонной смеси в верхней части устройства.

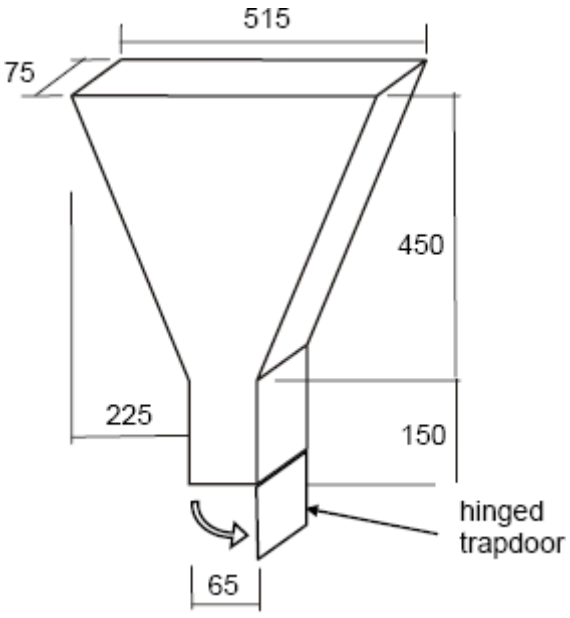


Рисунок Б.2 - V-образная воронка

2.3 Порядок проведения испытаний

Очиститьворонкуинижнююзаслонку.Увлажнитьвнутреннююповерхность изаслонку.Закрытьзаслонкуизаполнитьбетоннойсмесьюбезштыкованияиливстр яхивания. Правилом снять излишки бетона вровень с верхней частью воронки. Установить под воронку пустую емкость. По истечении (10 ± 2) сек. после наполнения воронки открыть заслонку и измерить время t_v, с точностью до 0,1 сек., с момента открытия воронки до того, как вся бетонная смесь вытечет из нее. t_v - обозначает время истечения из V-воронки.

2.4 Обработка результатов испытания

2.4.1 Отчет об испытании должен включать:

Маркировкуобразца;

Место проведенияиспытаний;

Дату проведенияиспытаний;

Значение t_v (время истечения изV-воронки);

Время с момента окончания перемешивания и проведенияиспытаний;

Указания отклонений от последовательности проведения испытаний, указанной в этомдокументе.

2.4.2 Этот отчет также может включать:

Значение температуры бетона в моментиспытания;

Время, затраченное на проведениеиспытаний.

3 Испытание бетонной смеси L-boxtest

3.1 Общие положения

3.1.1 L-box применяется для оценки формуемостиЛМБ. Этот показатель характеризует поведение бетонной смеси при прохождении узких мест, например, между стержнями арматуры без расслоения и агломерации крупного заполнителя. Существуют две разновидности испытания: с 2-мя стержнями и с 3-мя стержнями. Испытание с 3 стержнями моделирует более плотное армирование.

3.1.2 Основные принципы испытания заключаются в том, что бетонная смесь, определенного объема, течет горизонтально через зазоры между гладкими вертикальными стержнями. По окончании испытаний проводят измерения высоты слоя бетона за арматурой.

3.2 Средства контроля и вспомогательное оборудование

3.2.1 Схема и размеры L-box представлены на рисунках Б 3.1 и Б 3.2 (допускаемые отклонения ± 1 мм). L-box должен иметь жесткую конструкцию, гладкие плоские поверхности, не подверженные действию цементного теста и ржавлению.

Вертикальныйбункерможетбытьсъемнойконструкциидляоблегченияпроцессаза чистки.Объем вертикального бункера должен быть (12,6 – 12,8) л, бункер заполняется бетонной смесью до верхнего уровня.

3.2.2 В комплект установки входят 2 узла, первый, состоящий из 2-х гладких стержней диаметром 12 мм с расстоянием между ними 59 мм при испытании с 2 стержнями, и второй, состоящий из 3-х гладких стержней диаметром 12 мм с расстоянием между ними 41 мм при испытании с 3 стержнями. Эти узлы взаимозаменяемы. Стержни в ящике располагаются вертикально и на равном расстоянии от стенки.

ПРИМЕЧАНИЕ: предпочтительно использовать металлическую форму, но можно использовать и 12 мм фанеру с полимерным покрытием.

3.2.3. Линейка, (0 – 300) мм с ценой делений 1,0 мм.

3.2.4 Емкость, для бетона объемом не менее 14 л.

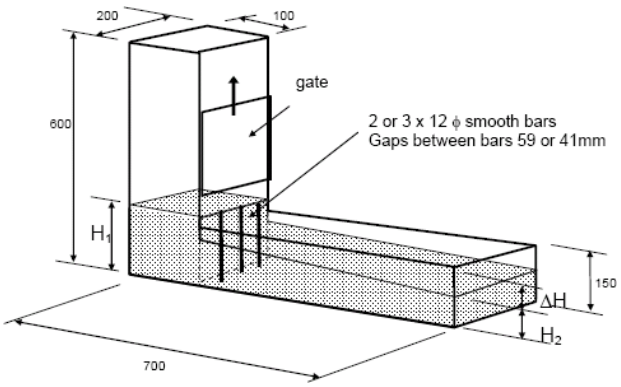


Рисунок 3.1 - Общий вид L-box

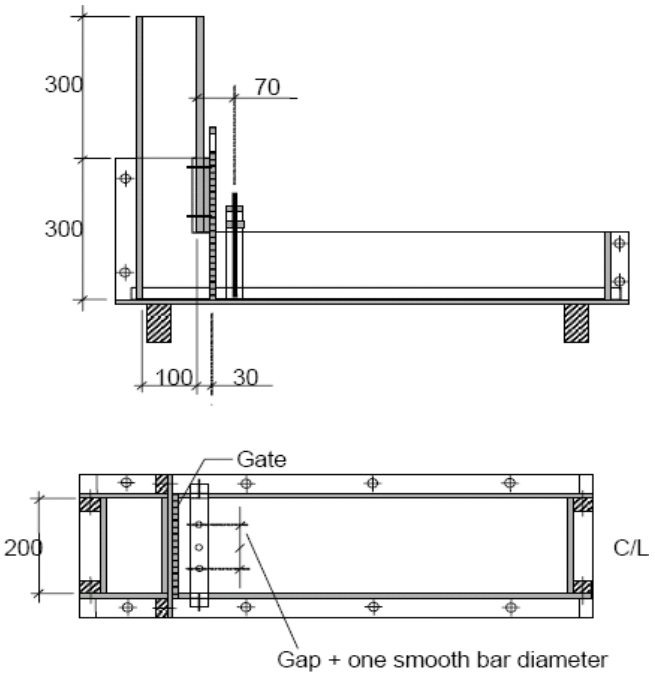


Рисунок 3.2 - Размеры и конструкция L-box

3.3 Порядок подготовки к испытанию

Объем замеса должен составлять около 17 л в соответствии со стандартом [12].

3.4 Порядок проведения испытания

3.4.1 Установить L- box на ровном горизонтальном основании и закрыть заслонку между вертикальной и горизонтальной секцией. Залить бетонную смесь в вертикальную секцию и оставить на (60 ± 10) секунд. Необходимо проконтролировать наличие признаков расслоения, после чего поднять заслонку.

3.4.2 По прекращению течения бетонной смеси необходимо измерить расстояние по вертикали в конце горизонтальной секции L-box, между поверхностью бетонной смеси и поверхностью горизонтальной секции ящика в трех точках. Среднее значение трех измерений используется для расчета средней глубины бетона, обозначаемой H2 мм. Такую же процедуру необходимо провести для расчета глубины бетона сразу за заслонкой, обозначаемой H1 мм.

3.5 Обработка результатов испытания

3.5.1 Формуемость PA рассчитывается из следующего уравнения

PA = H2/H1 (Б.3.5)

3.5.2 Отчет об испытании включает:

Маркировкуобразца;

Место проведенияиспытаний;

Дату проведенияиспытаний;

Расслоение, наблюдаемое при наполненииL-box;

Вид испытания: с 2 или 3стержнями:

Коэффициент проходимости с точностью до0,01;

Время с момента окончания перемешивания и проведенияиспытаний;

Указания отклонений от последовательности проведения испытаний, указанной в этомдокументе.

3.5.3 Этот отчет также может включать:

Значение температуры бетона в моментиспытания;

Время, затраченное на проведениеиспытаний.

3.6 Приложение

Существует метод, в котором обработка результатов испытаний проводится по формуле:

$PA = H2/H_{max}$, (Б.3.6)

где H_{max} соответствует 91 мм и является теоретической высотой H2, в случае если вертикальный бункер содержит ровно 12,7 литров ЛМБ который полностью «самовыравнивается» в процессе испытания.

Использование этого расчета делает измерения менее трудоемкими и повышает точность испытаний.

Однако для использования этой константы объем ЛМБ в бункере и все размеры формы должны быть точными.

Предупреждение:

Величина РА при использовании H2/H_{max} будет отличаться от показателя полученного при использовании H2/H1, и ее не следует использовать для подтверждения соответствия требованиям приложения этих рекомендаций.

4 Испытание устойчивости к расслоению

4.1 Общие положения

4.1.1 Испытание на устойчивость к расслоению используется для оценки устойчивости литого модифицированного бетона к расслоению.

4.1.2 Принцип испытания заключается в том, что после отбора пробы бетонную смесь оставляют на 15 минут и отслеживают появление цементного молочка. После этого верхнюю часть образца выливают на 5 мм сито. По истечении 2-х минут фиксируется вес материала, под ситом. Рассчитывается коэффициент расслоения как соотношение смеси над ситом к количеству смеси, под ситом.

4.2 Средства контроля и вспомогательное оборудование

4.2.1 Круглое сито из перфорированного металла, с 5 мм квадратными отверстиями, диаметром 300 мм и высотой 40 мм, в соответствие со стандартом ISO 3310-2, в комплекте с емкостью.

4.2.2 Весы, с плоской платформой, для определения массы заполненной емкости и с пределом измерений не менее 10 кг, с погрешностью измерений не более 20 г.

4.2.3. Емкость для смеси должна быть изготовлена из пластика или металла, иметь внутренний диаметр (300 ± 10) мм, емкость (11 – 12) л и быть оборудована крышкой.

4.3 Порядок подготовки к испытанию

Пробу для испытаний необходимо подготовить в соответствии со стандартом [12]

4.4 Порядок проведения испытания

4.4.1 Поместить (10 ± 0,5) л бетонной смеси в емкость и закрыть крышкой. После этого оставить на (15 ± 0,5) минут в спокойном состоянии.

4.4.2 Убедиться, что весы находятся в равновесии и не испытывают вибрацию. Взвесить пустую емкость и зафиксировать вес (Wps). Затем установить сито на емкость и вновь зафиксировать вес.

4.4.3Через 15 минут после заполнения емкости бетонной смесью снять крышку и отметить наличие цементного молока на поверхности бетона. Установить сито и емкость на весы, расстояние между ситом и дном емкости должно составлять (500 ± 50)мм,

залить бетонную смесь в количестве (4,8 ± 0,2) кг (включая цементное молочко, если есть в наличии) в центр сита. Записать массу бетонной смеси (W_Cгр.). По истечении (120 ± 5) сек. вертикально поднять сито без встряхивания. Записать массу емкости с бетонной смесью(W_{PS}).

4.5 Обработка результатов испытания

4.5.1 Степень расслоения SR рассчитывается из следующего уравнения с точностью до 1 % :

SR = (Wps – Wp) 100 / Wc %(Б.4)

4.5.2 Отчет об испытании включает:

Маркировкуобразца;

Место проведенияиспытаний;

Дату проведенияиспытаний;

Присутствие цементного молочка после 15 минутотстаивания;

Расслаиваемость с точностью до1%;

Коэффициент проходимости с точностью до0,01;

Время с момента окончания перемешивания и проведенияиспытаний;

Указания отклонений от последовательности проведения испытаний, указанной в этомдокументе.

4.5.3 Этот отчет также может включать:

Значение температуры бетона в моментиспытания;

Время, затраченное на проведениеиспытаний.

Список использованных источников

[1] BSEN 12350-9:2010 Testingfreshconcrete. Self-compacting concrete. V-funnel test (Испытаниясвежегобетона. Часть 9. Самоуплотняющийсябетон. Испытаниеворонкой).

[2] BS EN 12350-10:2010 Testing fresh concrete - Part 10: Self-compacting concrete. L-boxtest (Испытания свежего бетона. Часть 10. Самоуплотняющийся бетон. ИспытаниеL-образнымящиком).

[3] BS EN 12350-11:2010 Testing fresh concrete. Self-compacting concrete. Sieve segregation test (Испытаниясвежегобетона. Часть 11. Самоуплотняющийся бетон. Испытание расслоением на сите).

[4] СТО-70386662-306-2012 «Применение добавок на основе эфиров поликарбоксилатов производства концерна BASF при изготовлении вибрационных и самоуплотняющихся бетонов». Разработан ОАО ЦНИИС совместно с ООО «БАСФ Строительные системы».

[5] Несветаев Г.В. Некоторые вопросы применения добавок для бетонов // Бетон и Железобетон. 2011. №1. С. 78-80.

[6] Пособие к СП 52-101-2003 Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры

[7] BS EN 480-1:2006+A1:2011 Добавки к бетону, строительному и жидкому цементному раствору. Методы испытаний. Часть 1. Эталонный бетон и эталонный раствор для испытаний

[8] Войлоков И.А. Самоуплотняющиеся бетоны. Новый этап развития бетоноведения // Бетоны. 2008. № 4. С. 5-8.

[9] Соловьянчик А. Р., Коротин В. Н., Пуляев И. С., Третьякова Н. С.

Опыт применения самоуплотняющихся бетонных смесей при сооружении мостов и тоннелей. InternationalAnalyticalreview “ALITinform” №3 (25) 2012 (Международное аналитическое обозрение «Цемент, бетон, сухие смеси»

[10] СТО «Объекты использования атомной энергии. Основные требования при производстве работ с самоуплотняющимися бетонными смесями (СУБС)» стр. 25.

[11] BS EN 12350-8:2010 Testing fresh concrete. Self-compacting concrete. Slump-flow test (Испытаниясвежегобетона. Часть 8. Самоуплотняющийсябетон. Испытаниеподвижностибетоннойсмесиосадкойконуса).

[12] ЕН 12350-4:2000 Испытаниебетоннойсмеси - Часть 4: Степеньуплотняемости (EN 12350-4:2000 Testing fresh concrete - Part 5: Degree of compactibility)

[13] Строительные конструкции и материалы 3(65), 2017

Приложение 2

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 10360

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL

(21) 2024/1639.2

(22) 24.12.2024

(45) 04.04.2025

(54) Өздігінен тығыздалатын бетонды дайындауға арналған құрам
Состав для приготовления самоуплотняющегося бетона
Composition for the preparation of self-sealing concrete

(73) «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы (KZ)
Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (KZ)
«K.I. Satbayev Kazakh National Technical Research University» Non-profit joint stock company (KZ)

(72) Кульдеев Ержан Итеменович (KZ)
Жұмаділова Жанар Оразбеккызы (KZ)
Ахметов Данияр Акбулатович (KZ)
Құттыбай Мұса Талғатұлы (KZ)

Kuldeyev Yerzhan Itemenovich (KZ)
Zhumadilova Zhanar Orazbekkyzy (KZ)
Akhmetov Daniyar Akbulatovich (KZ)
Kuttybai Musa Talgatuly (KZ)

ЭЦҚ қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

С. Ахметов
С. Ахметов
S. Akhmetov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE