

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Сахалинский государственный университет»

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный  
научно-исследовательский и проектный институт Министерства  
строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской  
Федерации» (ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России»)

*На правах рукописи*



**Малюк Владислав Викторович**

**ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИОННОГО БЕТОНА ПРИ  
МОРОЗНЫХ И СОЛЕВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ  
(НА ПРИМЕРЕ О. САХАЛИН)**

2.1.5 – Строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:



Иностраннный академик РААСН,  
доктор технических наук, профессор  
Леонович Сергей Николаевич

Южно-Сахалинск, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОНА ПРИ МОРОЗНЫХ И СОЛЕВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ.....	15
1.1. Долговечность бетона в конструкциях морских портовых сооружений. Краткий анализ.....	14
1.2. Коррозия бетона в условиях морозного воздействия.....	17
1.3. Принципы проектирования бетонных и железобетонных конструкций по долговечности для условий с морозными и морозосолевыми воздействиями.....	28
1.4. Модели прогноза срока службы бетонных и железобетонных конструкций в условиях морозного и морозосолевого воздействий.....	32
1.5. Постановка задач исследования.....	48
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	51
2.1. Объекты исследований.....	51
2.2. Методология исследований.....	57
2.3. Методы натурных исследований.....	60
2.4. Методы лабораторных испытаний.....	63
ГЛАВА 3. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ НА О. САХАЛИН.....	67
3.1. Воздействие окружающей среды и условия эксплуатации бетонных конструкций в сооружениях.....	67
3.2. Виды и характер разрушения бетона в зоне переменного уровня воды.....	77
3.3. Технологии бетонных работ при изготовлении конструкций для морских портовых сооружений на Сахалине.....	82
3.3.1. Опыт применения обычной (традиционной) технологии бетона.....	86

3.3.2. Опыт применения современной технологии морозостойких бетонов.....	99
Выводы по главе 3.....	108
ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ЦИКЛА «ЗАМОРАЖИВАНИЕ – ОТТАИВАНИЕ» В ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ.....	110
4.1. Физико-математическая постановка задачи нестационарного теплопереноса.....	110
4.2. Моделирование динамики теплопереноса на стадии охлаждения.....	111
4.3. Моделирование теплообменных процессов в двухслойном теле: «замерзшая – талая» зоны.....	119
4.4. Решение краевой задачи нестационарной теплопроводности методом интегрального преобразования Лапласа.....	122
Выводы по главе 4.....	127
ГЛАВА 5. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БЕТОНА В МОРСКОЙ ВОДЕ В УСЛОВИЯХ ЗАМОРАЖИВАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ.....	128
5.1. Проектирование долговечности бетонных изделий для морозосолевого воздействия.....	128
5.1.1. Критерии долговечности бетона в условиях многоциклического замораживания и оттаивания.....	131
5.1.2. Критерии долговечности бетона при длительном замораживании.....	140
5.2. Реализация проектных решений по долговечности бетона на этапе строительства.....	142
5.3. Прогнозирование долговечности бетонных конструкций в морской воде в условиях замораживания и оттаивания.....	158

Выводы по главе 5.....	170
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	172
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	175
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	187
Приложение 1.....	188
Приложение 2.....	189
Приложение 3.....	190
Приложение 4.....	191
Приложение 5.....	192

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Актуальность вопросов, связанных с изучением долговечности строительных материалов, конструкций и сооружений, определена мировой тенденцией перехода к проектированию конструкций, зданий и сооружений по жизненному циклу [1-3]. Современная концепция проектирования строительных объектов – проектирование по эксплуатационным характеристикам, дает возможность вариативного подхода к назначению требований к материалам для строительных изделий, которые должны гарантировать прогнозируемый срок службы [4,5]. В настоящее время к основным направлениям научно-практической деятельности в области бетона и железобетона относят направления по созданию системы диагностики и прогнозных методов долговечности бетона применительно к различным условиям эксплуатации.

Стратегия развития Дальнего Востока до 2035 г. предусматривает модернизацию и расширение магистральной инфраструктуры РФ на БАМе и Транссибе, увеличение мощностей отечественных морских портов на Дальнем Востоке, развитие Северного морского пути, что предопределяет необходимость в принятии обоснованных эффективных проектных решений на основе расчетных моделей долговечности железобетона [6,7].

В связи с этим по личной инициативе в 2017 г. продолжены систематические исследования долговечности бетона портовых сооружений, начатые в 70-ые годы прошлого века на Сахалине, для расширения представлений о реальной работе бетона в сооружениях и возможности совершенствования методов проектирования и технологии долговечного бетона для агрессивных сред класса XF4. С 2021 г. эти исследования проводятся в соответствии с планом фундаментальных научных исследований Российской академии архитектуры и строительных наук России и Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства.

**Степень разработанности темы исследования.** Для оценки способности бетона сопротивляться морозному воздействию в 1894 г. была принята единая методика исследований, предложенная профессором Н.А. Белелюбским, которая сохранилась до настоящего времени. Практически с начала исследований морозостойкости до настоящего времени, т.е. в течение более 100 лет, проблема обеспечения долговечности бетона морских гидротехнических сооружений решалась путем повышения морозостойкости [8-13]. Решению данного вопроса посвящены научные труды В.М. Москвина, Ф.М. Иванова, В.С. Гладкова, В.Ф. Степановой, С.В. Федосова, В.Е. Румянцевой, А.Т. Беккера, В.Т. Ерофеева, Е.М. Чернышова, Т.С. Powers, G. Fagerlund. Основным достижением проведенных исследований явилось то, что были описаны механизмы промерзания бетона и установлена важная роль воздухововлекающих добавок в обеспечении высокой морозостойкости.

На Дальнем Востоке систематические натурные и лабораторные исследования стойкости бетона морских гидротехнических сооружений в период с 1970 г. по 1990 г. проводились в Сахалинской научно-исследовательской лаборатории ВНИИ транспортного строительства (ЦНИИС), а затем, после реорганизации лаборатории, исследования в данном направлении продолжаются в компании ООО «Трансстрой-Тест» [14, 15]. Мониторинг сооружений, построенных за последние 15 лет, показывает, что не редки случаи разрушения бетона в зоне переменного уровня после непродолжительного срока эксплуатации.

Данная работа является продолжением исследований по проблеме долговечности бетонных изделий на основе изучения реальных условий работы бетона в конструкциях морских сооружений на побережье о. Сахалин. Коррозионные процессы с трудом моделируются во времени и требуют длительных испытаний, поэтому проверка достоверности предлагаемых методов прогноза долговечности в натуральных условиях является важной составляющей для разработки модели кинетики процесса коррозии.

**Научная гипотеза диссертационного исследования** заключается в том, что продолжительность срока службы железобетонных конструкций определяется взаимодействием двух ключевых периодов их жизненного цикла: этапа инициации и этапа деградации. На этапе инициации, связанном с процессами водонасыщения, зависящими от механизма замораживания бетона, происходит начало воздействия на конструкцию. На этапе деградации конструкция становится менее надежной и устойчивой в результате трещинообразования в бетоне. Переход от этапа инициации к этапу деградации происходит, когда достигается критическая степень водонасыщения.

**Цель диссертационного исследования** заключается в комплексном исследовании механизмов деградации бетона в транспортных сооружениях на о. Сахалин в природно-климатических условиях, а также в формализации параметров процесса при разработке математической модели его реальной работы в конструкции для расчета срока службы и оптимизации технологии обеспечения долговечности бетона, который эксплуатируется в агрессивных средах класса XF4.

**Задачи диссертационного исследования:**

- систематизировать опыт строительства и эксплуатации портовых сооружений на о. Сахалин в природно-климатических условиях на основе многолетних (более 50 лет) лабораторных исследований, проведенных в Сахалинской научно-исследовательской лаборатории ЦНИИС, лаборатории ООО «ТрансстройТест», а также результаты практического внедрения и мониторинга конструкций;
- исследовать механизм замораживания и процессы водонасыщения бетона в зоне переменного уровня воды и определить критические параметры бетона для проектирования его долговечности в зависимости от механизма замораживания;
- исследовать состояние и свойства бетона в зоне переменного уровня воды и определить возможные причины его разрушения с учетом

конструктивного исполнения портовых сооружений, технологии бетонных работ и предполагаемого срока службы;

- разработать математическую модель, описывающую теплообменные процессы цикла «замораживание – оттаивание» в железобетонных конструкциях гидротехнических сооружений; провести численное моделирование процесса интенсификации теплопереноса на стадии охлаждения и анализ процессов теплообмена в двухслойной структуре, включая зоны «замерзшую» и «талую»;

- разработать направления исследований с целью улучшения методов проектирования и технологии создания долговечного бетона для эксплуатации в условиях замораживания-оттаивания при воздействии морской воды; проанализировать существующие методы и технологии создания бетона и определить области их совершенствования с учетом воздействия замораживания-оттаивания.

**Научная новизна** наиболее существенных результатов:

- установлены и систематизированы механизмы замораживания и разрушения бетона на различных участках в зоне переменного уровня воды морских сооружений, что позволяет классифицировать морские сооружения с учетом типологии морозной нагрузки на бетон; определены доминирующие свойства бетона, определяющие кинетику процесса коррозии при реальных условиях эксплуатации портовых и транспортных сооружений в климатических условиях о. Сахалин;

- установлены концепции долговечности бетона и прогнозирования срока службы конструкций в морской воде в условиях замораживания-оттаивания, а также даны рекомендации по совершенствованию методов проектирования долговечных бетонов, выражающиеся в определении основных факторов, влияющих на долговечность бетонных конструкций и обеспечивающих их стабильность и нормативный срок службы в морской воде, что способствует разработке и применению более эффективных



методов проектирования, с учетом повышения качества и долговечности бетонных конструкций для эксплуатации в данных условиях;

- разработана математическая модель теплообменных процессов в бетонной модельной пластине на этапах замораживания и оттаивания, позволяющая проводить построение температурного поля и анализ влияния основных параметров системы на теплоперенос и температуру среды на стадиях замораживания и оттаивания; разработаны метод и алгоритм решения задачи и проведены численные исследования скорости продвижения границы зон промерзания и оттаивания;

- установлены показатели, характеризующие нагрузку от климатических воздействий на бетон в агрессивной среде класса XF4, которые выражаются в рекомендациях для апробации и практического использования показателей бетона для оценки соответствия проектных решений по долговечности на этапе строительства, что способствует повышению качества и надежности строительных конструкций.

**Теоретическая и практическая значимость результатов исследования:**

– выявленные механизмы замораживания бетона на различных участках зоны переменного уровня, а также возможные механизмы и причины раннего разрушения бетона на этих участках, значительно расширяют область исследования процессов деградации бетона в транспортных сооружениях на о. Сахалин в природно-климатических условиях;

– установленные параметры влияния минерализованной среды в качестве агрессивного фактора для бетона морских и транспортных сооружений, критические свойства бетона, обеспечивающие срок службы портовых сооружений в зоне переменного уровня воды не менее 100 лет, способствуют расширению области применения методов проектирования и технологии создания долговечного бетона для эксплуатации в условиях замораживания-оттаивания при воздействии морской воды;

– предложены направления исследований в области совершенствования методики проектирования долговечности бетона и технологии бетонных работ

с учетом механизма его замораживания для получения долговечных конструкций, эксплуатируемых в морской воде в условиях замораживания-оттаивания; разработаны методы оценки соответствия проектных показателей долговечности на этапе изготовления и приемки конструкции в эксплуатацию, что оказывает влияние на разработку и создание долговечных конструкций, эксплуатируемых в морской воде в условиях замораживания-оттаивания;

– предложено математическое описание процессов нестационарного теплопереноса в бетоне на этапах замораживания и оттаивания, основанное на методе «микропроцессов», которое учитывает явления фазового перехода на границе раздела зон и позволяет определять теоретическое время достижения границы промерзания бетона. Установленные зависимости значительно расширяют область понимания процессов нестационарного теплопереноса в бетоне и методы его описания, что оказывает влияние на разработку более точных моделей и методик прогнозирования промерзания бетона, что в свою очередь способствует повышению долговечности конструкций, эксплуатируемых в условиях замораживания и оттаивания;

– сформулированы рекомендации, которые позволяют оптимизировать технологические решения для обеспечения долговечности в конкретных условиях эксплуатации, что дополняет область проектирования оптимальных технологических решений для обеспечения долговечности конструкций. Предложенные рекомендации могут быть полезны в практической деятельности, где требуется рациональный подход к выбору технологических решений для создания долговечных конструкций в конкретных условиях эксплуатации;

– результаты диссертационной работы применялись при отработке технологических режимов бетонных работ на объектах при строительстве новых и реконструкции действующих морских портовых и транспортных сооружений, на предприятиях стройиндустрии Сахалинской области, а также использовались при подготовке экспертных заключений о причинах разрушения бетона в конструкциях, подверженных действию морской воды в условиях замораживания-оттаивания.

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

Методология исследований включает такие методы, как наблюдения и эксперимент для проведения натурных испытаний, анализ и моделирование для построения теоретических зависимостей. Задачи, поставленные в работе, решались на основе системного подхода к изучению факторов, определяющих долговечность в агрессивных средах класса XF4 на всех этапах жизненного цикла бетона: проектирование, изготовление конструкций, эксплуатация. Исследования проводились с использованием общепринятых физико-механических и физико-химических методов оценки качественных показателей материалов для бетона, свойств бетонной смеси и бетона в конструкциях, принятых в отечественной и зарубежной практике.

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

- результаты натурных исследований коррозионного повреждения бетона портовых сооружений;
- разработанные требования к свойствам бетонной смеси и технологическим режимам изготовления изделий, основанные на установлении определяющего критического свойства бетона, для обеспечения стойкости бетона в нормативные сроки службы портовых и транспортных сооружений в условиях о. Сахалин;
- концепция моделирования долговечности бетона и прогнозирования срока службы конструкций в условиях морозного воздействия; результаты моделирования динамики теплопереноса на стадии охлаждения железобетона и теплообменных процессов в двухслойном теле: «замерзшая – талая» зоны, полученные с помощью разработанной математической модели теплообменных процессов цикла «замораживание – оттаивание» в железобетонной конструкции гидротехнического сооружения.

**Достоверность результатов и выводов диссертационного исследования** подтверждается их сходимостью и согласованностью с известными закономерностями многочисленных экспериментальных данных, полученных с использованием стандартных и информативных методов

исследования. Выводы и рекомендации исследования широко апробированы и внедрены в практику строительства.

**Апробация работы:** результаты диссертационного исследования представлены и рассмотрены на Международном геотехническом симпозиуме «Геотехника строительства промышленных и транспортных сооружений азиатско-тихоокеанского региона», г. Южно-Сахалинск, 2018 г.; X круглом столе «Дорожное строительство – Дальний Восток-2018», г. Хабаровск, 2018 г.; XI круглом столе «Дорожное строительство – Дальний Восток-2019», г. Хабаровск, 2019 г.; Международной научно-технической конференции «Проблемы современного строительства», г. Минск, 2019 г.; Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность инженерных сооружений в регионах со сложными природными условиями», г. Владивосток, 2021; Международной научно-технической конференции «FarEastCon», г. Владивосток, 2018, 2020-2022 гг.

**Внедрение результатов исследований.** Результаты исследования нашли практическое применение на предприятиях по производству строительных материалов: филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» ДальНИИС (г. Владивосток) (акт внедрения Приложение 1), ООО «Сахалинстройинвест» (г. Южно-Сахалинск) (акт внедрения Приложение 2) и ООО «МИДО» (г. Холмск) (акт внедрения Приложение 3).

Теоретические положения диссертационной работы, результаты экспериментальных и натурных исследований используются в учебном процессе кафедры строительства ФГБОУ ВО СахГУ при проведении лекционных и лабораторных занятий для обучения бакалавров направления подготовки 08.03.01 «Строительство» по дисциплинам «Строительные материалы», «Обследование, испытание и реконструкция зданий и сооружений», «Железобетонные и каменные конструкции», «Основы строительных конструкций» (акт внедрения Приложение 4).

**Личный вклад автора.** Автор сформулировал цели и задачи, разработал программу и методологию исследований, разработал

теоретическую концепцию; организовал и лично участвовал в проведении натурных обследований и экспериментальных исследований в лабораториях и на строительных площадках; обработал и проанализировал результаты исследований. Автор лично участвовал в обсуждении результатов исследований с научным руководителем.

**Область исследований** соответствует **паспорту специальности 2.1.5 – Строительные материалы и изделия** в части направления исследований:

п. 10. Разработка новых и совершенствование существующих методов повышения стойкости строительных материалов, изделий и конструкций в условиях воздействия физических, химических и биологических агрессивных сред на всех этапах жизненного цикла;

п. 11. Разработка методов прогнозирования и оценки долговечности строительных материалов и изделий в заданных условиях эксплуатации;

п. 13. Разработка материалов и технологий для строительства, реконструкции и санации зданий и сооружений в различных климатических условиях с учетом сопротивляемости температурно-влажностным и другим факторам.

**Публикации.** Результаты исследований, отражающие основные положения диссертационной работы, изложены в 16 научных публикациях, в том числе: 5 статьях в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 3 статьях в научных журналах, индексируемых в международных реферативных базах данных Web of Science и Scopus; монографии.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы из 118 наименований и 6 приложений. Общий объем работы изложен на 192 страницах, включает 53 рисунка и 14 таблиц.

**Благодарность.** Автор выражает глубокую благодарность и признательность за помощь в реализации экспериментальных исследований научному консультанту доктору экономических наук, профессору, советнику РААСН Константину Борисовичу Строкину.

## **ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОНА ПРИ МОРОЗНЫХ И СОЛЕВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

### **1.1. Долговечность бетона в конструкциях морских портовых сооружений. Краткий анализ**

Необходимость в систематических исследованиях долговечности бетона в морской воде возникла в середине 19 века в связи с развитием строительства портовых сооружений и началом широкого применения цемента в бетонах для морских гидротехнических сооружений [8, 10, 16]. По мере того, как бетон становился основным материалом в строительстве морских портов, возник вопрос о причинах прогрессирующего разрушения отдельных сооружений. В результате обсуждения данного вопроса был установлен факт, что наряду с быстро разрушающимися сооружениями имеются сооружения, выполненные из тех же материалов и находящиеся в одинаковых условиях эксплуатации, но имеющие удовлетворительное состояние. Первый опыт неудачного применения бетона в морских гидротехнических сооружениях показал, что вопрос о стойкости цементных растворов и бетонов в морской воде является сложным ввиду многочисленных действующих факторов, и для разрешения вопроса о стойкости бетона в морской воде необходимы систематические исследования. Аналитический обзор литературных данных по вопросу изучения стойкости бетона в морской воде [8, 10, 11, 16-26] показал, что можно условно выделить характерные этапы исследований, на основании которых формировались представления о влиянии морской воды как агрессивного фактора, воздействующего на бетон:

1-ый этап: период 1850-1900 гг. характеризовался исследованиями влияния цементного вяжущего на стойкость бетона, которые позволили сделать следующие выводы: причины разрушения связаны не только с морской водой, но и со свойствами бетона; при определенных показателях

плотности и водонепроницаемости гидравлические цементы могут обеспечить стойкость бетона в морской воде.

2-ой этап: период 1900-1950 гг. характеризовался изучением условий эксплуатации бетона, которые включали исследования влияния солености морской воды; климатических условий; биологических факторов. В результате исследований установлено: климатические условия имеют решающее значение для долговечности бетона; частота смены циклов замораживания-оттаивания и температура замораживания в климатических условиях имеет решающее значение; основной причиной быстрого разрушения бетона является совместное действие воды и мороза; размер и характер разрушения зависит от совокупности условий внешней среды и свойств бетона; целесообразно в морских гидротехнических сооружениях выделять зоны по признаку условий воздействия внешней среды; наиболее значительные разрушения бетона в морских гидротехнических сооружениях наблюдаются в зоне переменного уровня воды.

3-ий этап: период 1950-1990 гг. характеризуется развитием теоретических представлений о воздействии отрицательных температур на водонасыщенный бетон и разработкой технологических путей повышения стойкости бетона в условиях агрессивных воздействий. В первую очередь это касалось разработки технологии первичной защиты бетона на основе применения эффективных структурообразующих добавок [24-26]. Основой для технологических разработок изготовления высокоморозостойких бетонов явились теоретические постулаты о механизме разрушения бетона при воздействии отрицательных температур [27-29]. Разработка и внедрение воздухововлекающих добавок для бетона морских гидротехнических сооружений позволили в корне изменить подход к защите бетона в зоне переменного уровня. Исследования на данном этапе позволили установить следующее: главным фактором, определяющим стойкость бетона в морской воде, является его проницаемость; высокую стойкость бетону в морской воде можно обеспечить мерами первичной защиты; развитие процессов коррозии

арматуры зависит от скорости деградации защитного слоя бетона; плотный бетон существенно замедляет процесс диффузионного проникновения хлорид-ионов и при достаточной толщине защитного слоя опасное количество хлорид-ионов может накапливаться у поверхности арматуры за период времени, сопоставимый со сроком службы сооружения; правила традиционной технологии бетона в отношении требований к цементу и заполнителям оказываются чрезмерными при использовании технологии с применением эффективных воздухововлекающих добавок для повышения морозостойкости; натурные испытания в морских условиях и натурных стендах Кислогубской опытной приливной электростанции (ПЭС) и Сахалинской лаборатории ЦНИИС Минтрансстроя доказали возможность придать бетону высокую коррозионную стойкость в морской воде; механизм влияния морской воды на морозостойкость объясняется с позиций физического воздействия.

4-ый этап: период с 1990 года по настоящее время характеризуется исследованиями в двух направлениях: повышение эффективности первичной защиты бетона за счет применения высокофункциональных бетонов (high performance concrete, НРС); разработка методов расчета (прогноза) сроков службы конструкций при эксплуатации в агрессивных средах.

Новое поколение высоких (НРС) и ультравысоких (УНРС) технологий позволяет получать высокофункциональные бетоны с высокими эксплуатационными свойствами: долговечностью, повышенной прочностью, химической стойкостью и защитой по отношению к стальной арматуре [18]. Такие показатели достигаются за счет высокой плотности бетона, получение которой основано на следующих факторах: низком В/Ц (0,2-0,3), применении микро- и нанодисперсных составляющих (микрокремнезем, нанокремнезем, нанотрубки и т.д.) и пластифицирующих добавок. В настоящее время эти бетоны обычно используются при возведении уникальных объектов, поскольку высокие требования к уровню технологии и высокая стоимость ограничивают область применения.



## 1.2. Коррозия бетона в условиях морозного воздействия

При анализе многочисленных результатов исследований стойкости бетона в морской воде выявлено, что основной причиной быстрого разрушения бетона является действие отрицательных температур на водонасыщенный бетон. Систематические исследования стойкости бетона при морозных и солевых воздействиях стали проводиться с конца IX века [8]. В суровых климатических условиях наибольшие разрушения бетона морских сооружений наблюдали в зоне переменного уровня воды, что объясняли воздействием периодического замораживания и оттаивания. Большим достижением в области исследования стойкости бетона при многократном замораживании и оттаивании в насыщенном водой состоянии на этом этапе явилось разработка методики оценки морозостойкости бетона. В 1884 г. была принята единая методика исследований каменных материалов, предложенная профессором Н.А. Белелюбским [9]. Принципиальная основа этой методики сохранилась до настоящего времени.

Под термином морозостойкость бетона стали понимать способность сохранять свою прочность при многократном замораживании и оттаивании в насыщенном водой состоянии [30]. Единая методика испытания бетона на морозостойкость, несмотря на ее условность, позволила установить влияние на морозостойкость таких показателей, как состав бетона, качество и расход цемента, качество заполнителей, водоцементное отношение, степень гидратации цемента, пористость цементного камня, условия замораживания и др. [8, 10-12, 16, 29, 31-36]. В результате установлена тенденция изменения прочности бетона в процессе испытания на морозостойкость.

На этой основе предлагалось дифференцировать бетоны по уровню морозостойкости. К бетонам низкой морозостойкости относят бетоны с маркой по морозостойкости менее F300, а бетоны с маркой более F1000 – к особо морозостойким [37]. О.Б. Кунцевич к высокоморозостойким бетонам относит бетоны марки более F1000 [9]. А.М. Подвальный предлагает

морозостойкость дифференцировать по 4 классам: класс М1 (F25-F100); класс М2 (F150-F300); класс М3 (F400-F600); класс М4 (F800-F1000) [20]. В соответствии с ГОСТ 25192 [38] по морозостойкости бетоны подразделяются на 3 вида: низкая (марка F50 и менее), средняя (марка F50-F300), высокая (марка более F300).

Как было отмечено, в исследовании долговечности бетона наблюдаются характерные этапы. В 40-ых годах прошлого века появились первые рабочие гипотезы для изучения морозостойкости бетона А. Коллинза и Т. Пауэрса, известные как гипотезы кристаллизационного давления льда и гидравлического давления воды [13, 39]. Анализ этих гипотез приводится в научных работах отечественных и зарубежных ученых [9-11, 13, 31, 32, 34, 40-43]. Теоретические положения этих гипотез основаны на том, что разрушение бетона при его замораживании в водонасыщенном связано с образованием в порах льда, объем которого примерно на 9 % больше объема замерзшей воды.

Гипотеза кристаллизационного давления льда рассматривает непосредственное воздействие кристаллизующего льда на стенки пор и развитие в зонах воздействия местных перенапряжений растяжения, способных вызвать локальные разрушения в наиболее слабых элементах структуры конгломерата.

Гипотеза гидравлического давления воды основана на предположении, что замерзание воды в бетоне происходит послойно по мере его промерзания. При этом часть воды отжимается внутрь тела бетона. С ростом в порах цементного камня кристаллов льда в оставшейся не замерзшей жидкой фазе возникает гидростатическое давление, т.е. появляются силы, которые создают растягивающие напряжения в капиллярных порах цементного камня. В случае недостаточной прочности цементного камня происходит постепенное локальное разрушение стенок капилляров. Однако под гидростатическим давлением жидкая фаза может отжиматься в резервные поры, тогда растягивающие напряжения снижаются или совсем не возникают.

Известны и другие научные гипотезы морозостойкости, например, адсорбционная [39]. Отмечают [32], что в настоящее время выдвинуто более пятнадцати гипотез о причинах разрушения бетона при попеременном замораживании и оттаивании. Однако наибольшее признание из предлагаемых гипотез получили гипотезы кристаллизационного и гидравлического давления [36, 39]. В основе этих гипотез главным фактором, определяющим морозостойкость бетонов, является структура порового пространства и кинетика образования льда в порах. Общепринятым фактом считают то, что в результате физических и физико-механических процессов, протекающих в поровой структуре цементного камня (фазовые переходы, осмос, капиллярные явления и др.), появляются силы, вызывающие напряжение. Следствием этих напряжений может быть деформация цементного камня или бетона. Снижение прочности бетона при циклах замораживания-оттаивания (ЗО) связывают с накоплением механических повреждений под действием растягивающих напряжений [10, 11, 36, 39, 42]. Высказана и обоснована гипотеза разрушения бетона замерзающей водой с учетом роста кристаллов льда в капиллярах или воздушных порах в связи с процессами переноса воды из гелеобразной массы твердеющего цементного камня под действием различных градиентов. В результате постепенного заполнения условно-замкнутых пор водой возможно постепенное накопления дефектов в структуре пор и ее разрушение по усталостному типу [44].

В литературе изложены и проанализированы различные гипотезы механизма деградации бетона при его замораживании [10, 11, 31, 39, 42]. Однако в качестве основы при планировании экспериментов и оценки их результатов принимают положения гипотез кристаллизационного и гидравлического давления. Эти две основные гипотезы рассматривают причинные аспекты морозного разрушения и не противоречат друг другу, поскольку обе рассматривают льдообразование в бетоне в качестве основного процесса, вызывающего разрушение. Схематично процесс разрушения цементного камня в соответствии с положениями этих теорий

представлен последовательными процессами [31]: локальное образование микротрещин – накопление микротрещин – слияние микротрещин – образование магистральной макротрещины. В тоже время, гипотезу гидравлического давления в ее современном виде считают более предпочтительной из-за того, что объясняет позитивную роль условно-замкнутых макропор в повышении морозостойкости бетона [31]. С одной стороны, условно-замкнутые поры, заполненные паровоздушной смесью, должны значительно снижать давление отжимаемой льдом воды, а, следовательно, и растягивающие напряжения в структурном каркасе цементного камня, с другой – в этих порах может происходить обрыв растущей трещины.

Привлекательной стороной гипотезы о гидравлическом давлении является то, что теоретические представления о морозостойкости цементного камня позволили проводить целенаправленные исследования зависимости морозостойкости бетона от структурных характеристик цементного камня. В первую очередь это касалось изучения важнейшей характеристики цементного камня – параметров его порового пространства: размера, формы и строения пор.

Несмотря на то, что изучению порового пространства посвящены многие научные работы [10], общепринятого определения понятия порового пространства и классификации параметра пор в настоящее время нет. В работе [10] под поровым пространством понимается объем незаполненный твердой фазой. В литературе приведены различные классификации пор [9, 33], например, предложена классификация порового пространства по изотермам адсорбции и сорбции, по энергии связи воды [9, 16]. Многие исследователи используют классификацию пор по размерам и происхождению. Выделяют следующие поры: гелевые размером 0,5-30 нм, капиллярные и контракционные размером от 30 нм до 50 мкм, микровоздушные размером 0,1-1 мм и поры уплотнения размером 1 мм [10]. Однако, при изучении морозостойкости поровую структуру характеризуют

не только величиной пор, но и такими параметрами, как общая пористость, открытая и закрытая пористость.

В представленной классификации пор при изучении морозостойкости цементного камня и бетона особое значение отводится капиллярным порам [9, 10], которые представляют часть воды цементного теста, не заполненной продуктами гидратации цемента. В цементном камне возможно образование двух систем капиллярных пор: непрерывной и условно изолированной. Непрерывно связанная система пор характеризует структуру цементного камня в первые дни твердения бетона. Эта система полностью заполнена водой [31]. В процессе дальнейшего твердения бетона капиллярная система пор может перейти в условно изолированную, если для этого будут созданы надлежащие условия твердения. Непрерывно связанная система пор создает условия для проникания воды в бетон, что оказывает негативное влияние на структуру бетона при воздействии циклов ЗО [33]. Этот фактор является решающим для традиционных бетонов без воздухововлекающих добавок. По классификации С.В. Шестоперова эти поры в структуре цементного камня являются «активными» [34].

С позиций гипотезы гидравлического давления объясняется физический аспект отрицательного влияния растворов солей на морозостойкость бетона. С одной стороны, в присутствии солей понижается температура замерзания воды и льдистость, что способствует снижению напряжений в структуре, с другой – за счет повышения вязкости жидкости может повышаться гидравлическое давление в порах. Экспериментально подтвержден факт пониженной стойкости бетона при испытании на морозостолестойкость по сравнению с испытанием на морозостойкость [31].

При попеременном замораживании и оттаивании водонасыщенного бетона явно прослеживаются два процесса: конструктивный и деструктивный. С.В. Шестоперов отмечает [34], что в любом бетоне с определенного числа циклов ПЗО деструктивные процессы будут превалировать над конструктивными, в результате начнется разрушение

бетона. Однако имеется информация [34] о том, что при значительной морозостойкости ( $F > 2000$ ) бетон при последующих испытаниях может не разрушаться. Это, очевидно, относится к бетонам особо высокой морозостойкости.

Экспериментально установлено, что прослеживается четкая зависимость морозостойкости бетона от условий твердения [9, 31, 45]. Отмечают [9], что цементный камень бетонов с наименьшим объемом капиллярных пор можно получить только при твердении бетонов в среде, обеспечивающей полное наполнение капиллярных пор твердеющего цементного камня водой и продуктами гидратации. Твердение бетона в таких средах должно повышать морозостойкость бетонов без добавок, т.е. когда отсутствует необходимая система условно замкнутых пор.

Влияние данного фактора проявляется в реальных условиях. Несоблюдение требуемых сроков твердения и установки конструкций в зимний период приводит к поверхностному разрушению бетона в первый зимний период [14].

Наличие конструктивной и деструктивной фазы в жизненном цикле бетона свидетельствует о том, что формирование поровой структура бетона происходит от момента затворения цемента водой до критического уровня деградации бетона. При этом в конструктивный период преобладают процессы структурообразования.

Традиционный теоретический подход к описанию процесса деградации, который характеризуется как «причинный», большое значение отводит процессу переноса влаги в поровой системе бетона [9, 10, 31, 33, 42, 46, 56]. За счет миграции воды, которая может осуществляться под влиянием капиллярных сил, температурного градиента или гидравлического давления, возможно изменение степени водонасыщения в отдельных объемах [39, 43, 47]. Экспериментальные данные о зависимости морозостойкости цементного камня от различных воздействующих факторов позволили получить важные качественные и количественные результаты.

Установленный факт, что основной причиной быстрого разрушения бетона портовых сооружений является совместное действие воды и мороза, определил теоретические и экспериментальные исследования в направлении изучения стойкости бетона к действию циклов ЗО, т.е. морозостойкости бетона. Экспериментальные исследования показали, что основой морозостойкости цементного камня является структура пор, которая должна быть тонкопористой и труднопроницаемой [9, 12, 16, 31, 33, 48, 49]. Основными факторами, влияющими на пористость цементного камня, являются вид цемента, возраст цементного камня, условия твердения, величина водоцементного отношения (В/Ц).

Морозостойкость цементного камня ( $F_{\text{цк}}$ ) можно выразить следующей функцией:

$$F_{\text{цк}} = f (В/Ц; Ц; Т; А), \quad (1.1)$$

где: В/Ц – водоцементное отношение; Ц – вид цемента; Т – период твердения; А – условия твердения.

Свойства бетона существенно отличаются от свойств цементного камня, поскольку присутствие в бетоне заполнителя существенно изменяет структуру материала. При исследовании морозостойкости бетона выделяют три структурных элемента: цементный камень, заполнитель и контактный слой между ними, в каждом из которых выделяют параметры поровой структуры [16]. Отмечают [11, 32, 33], что в результате присутствия в бетоне заполнителя, появляются новые объемы порового пространства, которые могут оказывать существенное значение на его морозостойкость. Избыток воды в бетонной смеси по сравнению с тем количеством, которое необходимо для гидратации цемента и смачивания поверхности заполнителей, является особенностью бетона [11]. Необходимость в этом обусловлена технологическими требованиями к бетонной смеси.

Процессы седиментации в значительной мере зависят от состава бетона, поэтому экспериментально установленное влияние состава бетона на морозостойкость, очевидно, следует рассматривать как косвенное

подтверждение роли состава бетона в формировании порового пространства. Морозное разрушение бетона может происходить по крупному заполнителю, растворной части и на границе раствора и крупного заполнителя.

По аналогии с морозостойкостью цементного камня ( $F_{цк}$ ) зависимость морозостойкости бетона ( $F_6$ ) от основных факторов можно выразить следующей функцией:

$$F_6 = f (В/Ц; Ц; Т; А, С, Д, З, П), \quad (1.2)$$

где: В/Ц – водоцементное отношение; Ц – вид цемента; Т – период твердения; А – условия твердения, С – состав бетона, Д – структурообразующие добавки, З – заполнители, П – параметр, характеризующий уровень технологии.

Деградация бетона при морозном воздействии представляет сложный процесс, развитие которого зависит как от внешних воздействий, так и от качественных и структурных показателей бетона [32]. Однако из многочисленных факторов, влияющих на морозостойкость бетона, Г.И. Горчаков [33] определил и количественно оценил два решающих фактора: В/Ц и степень гидратации цементного камня. Это утверждение в основном относится к традиционному (обычному) бетону, в структуре которого не организована система условно замкнутых пор.

Многообразие факторов и не аддитивность их совместного действия показывает, что проводить исчерпывающие экспериментальные исследования для разработки расчетных моделей морозостойкости не всегда целесообразно.

В настоящее время отмечают [31] два направления в разработке методов расчета морозостойкости бетона, которые отличаются выбором количества показателей, влияющих на морозостойкость бетона. Одно направление – учет как можно большего числа показателей, другое – выбор одного-двух важнейших показателей.

Для практического применения, безусловно, имеет преимущество второе направление, поскольку многочисленными экспериментами



установлено, что при долговечном заполнителе и цементе надлежащего качества морозостойкость бетона зависит от его водоцементного отношения, условий формирования цементного камня и степени гидратации цемента [31]. Основными факторами, определяющими уровень морозостойкости бетона, являются структура цементного камня и текстура бетона.

Исследования морозостойкости бетона в раннем возрасте показали, что этот показатель снижается в несколько раз [31]. Исходя из представлений о факторах, влияющих на морозостойкость бетона, данные результаты можно отнести к косвенному подтверждению влияния степени гидратации на морозостойкость бетона.

Вместе с тем, на морозостойкость бетона оказывает влияние ряд добавок, которые открывают новые технологические возможности в производстве бетонных работ. Многочисленные исследования и практика показали, что воздухововлекающие добавки являются мощным фактором в повышении морозостойкости бетона. За счет применения воздухововлекающих добавок, которые способствуют образованию в растворной части бетона системы условно замкнутых пор, морозостойкость может увеличиваться от 2 до 10 раз [31]. Воздухововлекающие добавки оказывают положительное влияние на технологические свойства бетона [50]. Экспериментальные исследования показали, что за счет этого можно снизить ряд требований к качественным показателям материалов для бетона и технологии бетонных работ. В работах [10, 17, 45, 51-53] отмечают, что при использовании в бетонах воздухововлекающих добавок (ВВД) можно получить высокую морозостойкость с использованием обычного цемента и шлакопортландцемента и применением крупного заполнителя с показателями морозостойкости значительно ниже морозостойкости бетона. Есть мнение, что за счет введения ВВД можно снизить требования к условиям твердения бетона.

Следовательно, есть основания считать, что в реальных условиях уровень морозостойкости бетона (морозостойкий и неморозостойкий) в основном будет определяться структурой цементного камня и раствора.

Несмотря на большой объем экспериментальных работ по исследованию морозостойкости бетонов, полученные результаты в лабораторных условиях не всегда могут гарантировать требуемую стойкость бетона в реальных условиях. В работах О.В. Кунцевича, А.Е. Шейкина, С.В. Шестоперова отмечаются факты, когда бетоны, удовлетворяющие проектным требованиям по морозостойкости, исчерпывали свою долговечность, и сооружения начинали разрушаться задолго до истечения нормативного срока службы [9, 32].

В результате исследований установлено, что в процессе жизненного цикла бетона в его структуре может происходить обводнение условно замкнутых пор, негативно отражающееся на морозостойкости бетона [9, 39]. Отмечают [31], что широкое применение добавок для повышения морозостойкости в 60-80-х годах еще не нашло подтверждения их эффективности в реальных условиях эксплуатации сооружений. Это предопределяет необходимость натурных исследований сооружений, изготовленных с применением воздухововлекающих ПАВ.

Поставленные вопросы требуют теоретического решения, поскольку это необходимо для практического применения. Дальнейшие исследования морозостойкости бетона для накопления экспериментальных данных и поиска объективных закономерностей между изменением различных свойств бетонов и их долговечностью в реальных условиях обусловлены требованиями практики. Только на этой основе можно перейти к математическому моделированию и управлению жизненным циклом сооружения на этапе эксплуатации.

Высокий эффект применения воздухововлекающих добавок для повышения морозостойкости является бесспорным и подтвержден многочисленными результатами экспериментальных работ и практическим

опытом применения в реальных суровых условиях эксплуатации морских сооружений [18, 24-26, 52, 53-55]. Однако применение воздухововлекающих добавок в бетоне дает не только положительный эффект, заключающийся в повышении морозостойкости, но и негативный – существенное снижение прочности. По данным А.М. Невилля [45] каждый процент дополнительного воздуха в бетоне снижает прочность на 5-6 %.

Обеспечить высокую морозостойкость и прочность бетона позволяют технологии придания ему высокого (НРС) и ультравысокого (УНРС) качества. Обеспечить высокие прочностные характеристики, морозостойкость и водонепроницаемость бетона возможно при соблюдении при изготовлении низкого В/Ц (0,2-0,4), введении микро- и нанодисперсных компонентов и комплексных пластифицирующих добавок [7, 18]. Такой подход приводит к формированию плотного бетона с микропористой структурой.

Исходя из общепринятых гипотез о механизме морозного разрушения, при исследовании воздействий на бетон попеременного замораживания и оттаивания рассматривают, как правило, основную причину снижения прочности – накопление повреждений в структуре бетона из-за повторных деформаций, связанных с напряжениями, возникающими при переходе воды из жидкого состояния в лед [12, 13, 31, 56, 57].

Кроме действия замерзшей воды в порах бетона – основного фактора, влияющего на морозостойкость бетона, – выделяют и другие значимые факторы: различие коэффициентов температурного расширения цементного камня, льда и заполнителей, наличие нестационарного температурного поля в теле бетона сооружений, воздействие солей водной среды. С учетом многообразия факторов, влияющих на морозостойкость бетона, это физическое свойство бетона отражает влияние ряда физических свойств: пористости, водопоглощения, проницаемости, и механических: прочности, деформативности на стойкость бетона в условиях морозного воздействия.

Считают, что выбор определения для термина морозостойкость должен учитываться при планировании исследований и оценки их результатов [12]. Исследование факторов, вызывающих появление деформаций в бетоне, является основной целью для разработки методов проектирования морозостойкого бетона.

### **1.3. Принципы проектирования бетонных и железобетонных конструкций по долговечности для условий с морозными и морозосолевыми воздействиями**

Литературные данные, посвященные анализу существующих методов определения стойкости бетона к морозному воздействию, показывают, что все основанные методы испытаний в определенной степени моделируют реальную нагрузку окружающей среды путем интенсификации процесса деградации [19, 31, 32, 58, 59]. В основном методы имитируют многократное циклическое ЗО бетона, а интенсификация разрушения осуществляется за счет скорости процессов замораживания и оттаивания, понижения температуры охлаждения бетона, усиления агрессивности среды, в которой происходят температурные воздействия.

Анализ факторов и их параметров, оказывающих влияние на стойкость бетона в условиях морозного воздействия, показывает, что нереально экспериментально исследовать морозостойкость с учетом всего многообразия. Приводятся данные о 190 факторах, влияющих на морозостойкость и долговечность бетона. Анализ 25 главных факторов из этого набора при трех интенсивностях составляет порядка 1030 сочетаний [12]. Поэтому модели испытаний бетона стремятся разрабатывать с учетом конкретных условий его работы в сооружении, выделяя критические показатели внешних воздействий, т.е. преобладающие показатели, которые определяют механизмы замораживания и разрушения бетона. Множество факторов, влияющих на механизм замораживания бетона, predetermined многообразие предлагаемых методов определения морозостойкости бетона.

Поэтому выбор метода зависит от цели исследования или технологии контроля качества [59].

В России приняты стандартные методы определения морозостойкости по ГОСТ 10060 [30]. Стратегия обеспечения морозостойкости бетона в России строится на принципах, предложенных профессором А.П. Белелюбским в 19 веке, которые впервые были закреплены в ГОСТ 4795 и ГОСТ 4800.

Несмотря на систематическое совершенствование традиционного метода определения морозостойкости, важнейшие принципы, основанные на многократном циклическом замораживании и оттаивании, остались почти неизменными. Во всех случаях критерием надежности тех или иных изменений в параметрах испытаний служит их сопоставление с данными прямых испытаний. Цель определения морозостойкости – оценить максимальное число циклов замораживания и оттаивания бетона, при котором характеристики бетона остаются в нормированных пределах, а также отсутствуют трещины, сколы, шелушение ребер образцов. Нормированными характеристиками бетона, как правило, являются показатели прочности бетона. В качестве критерия оценки факультативно рассматривается возможность оценивать морозостойкость по косвенным показателям: изменению динамического модуля упругости, скорости ультразвука и деформациям. Базовый метод можно рассматривать в качестве эталонного, поскольку при расхождении результатов определения морозостойкости в качестве окончательных принимают результаты базового метода. В стандарте даны соотношения между числом циклов испытаний и маркой бетона по морозостойкости.

Техническая сложность и большая продолжительность испытаний является принципиальным недостатком базового метода. На протяжении всего периода существования базовый метод подвергается критическому анализу и уточнениям [20]. Однако за последние 100 лет он принципиально не изменился, что свидетельствует о потребности практики в оценке важного

свойства бетона, которое имеет особое значение для обеспечения долговечности и эксплуатационной надежности бетонных и железобетонных изделий и сооружений. Большой объем результатов испытаний по базовому методу, который в наибольшей степени имитирует реальные воздействия на бетон морских гидротехнических сооружений таких характерных природно-климатических условий, как замораживание и оттаивание, дает основу для поиска объективных закономерностей между изменением различных свойств бетонов и их долговечностью и разработки надежных моделей прогноза долговечности строительных материалов.

Несмотря на то, что базовые методы не в полной мере отражают реальные условия эксплуатации сооружений, они позволяют проводить сравнительную оценку различных составов бетона и выполнять прогнозную оценку в случае разработки новых добавок для бетона и технологических приемов обработки бетонных смесей.

Метод оценки морозостойкости бетона по прочности – это разрушающий метод, который не позволяет проследить кинетику изменения свойств бетона в процессе испытаний. Однако он дает объективную количественную характеристику основному качественному показателю бетона – прочности, которая характеризует эксплуатационную надежность и механическую безопасность изделий и сооружений.

Высокая структурная чувствительность морозостойкости к составу, технологии, условиям твердения является основной причиной значительной неоднородности, которая намного выше неоднородности прочности [55]. Поэтому в соответствии с принятой дифференциацией морозостойкости по маркам теряется практическая значимость метода при оценке этого параметра [20].

Метод оценки морозостойкости по потере массы менее информативен, но позволяет делать качественную оценку состояния по внешним признакам в процессе всего испытания и по кинетике разрушения характеризовать систему структуры пор по ее связанности [9]. Например, Кунцевич О.В.

отмечает, что в бетонах без структурообразующих добавок наблюдается объемное разрушение, а в бетонах, в структуре которых создавалась система условно замкнутых пор, наблюдается поверхностная деструкция образца [9, 31]. Для количественной оценки морозостойкости по внешним признакам достаточно информативным является метод оценки в баллах, предложенный С.В. Шестоперовым [34].

Цель разработки и применения ускоренных методов – снижение трудоемкости, сокращения периода испытаний, простота и доступность для практического применения. Ускоренные и неразрушающие методы основаны на корреляционной связи между изменением показателей в этих методах и изменением прочности при базовом испытании. В исследовательских целях для наблюдения за кинетикой изменения свойств бетона широкое применение нашли неразрушающие методы. Основой для перехода от разрушающих к неразрушающим показателям оценки деструкции бетона является то, что это не вносит качественных изменений в методику определения морозостойкости. Критерием надежности неразрушающих методов во всех случаях служит их сопоставление с данными испытаний по базовому методу.

Обзор существующих методов определения морозостойкости показывает, что выбор подходящего метода испытаний зависит от поставленной цели [19, 30, 31, 59, 61]. Стандартизованные методы испытаний разработаны для целей контроля качества. На предприятиях обязательным условием является применение стандартных методов оценки морозостойкости. Для исследовательских целей применяется широкая линейка методов оценки морозостойкости. Однако ни один метод лабораторных испытаний не может полностью воспроизвести реальные условия морозного воздействия. Поэтому не существует единой модели испытаний. Методология испытаний бетона на морозостойкость нацелена на поиск оптимального выбора материала для конкретных условий эксплуатации. Следовательно, метод испытаний не должен допускать использования бетонов низкого качества и предъявлять

завышенные требования к технологии бетона. Принципы ускорения испытаний морозостойкости за счет ужесточения воздействующих факторов не всегда учитывают реальные воздействия на бетон. Этот недостаток присутствует во всех существующих методах. В конкретных условиях эксплуатации уровень воздействующих факторов может быть значительно ниже, чем принят при испытаниях. Возможны условия, в которых преобладающим фактором морозного воздействия не являются циклы замораживания-оттаивания. Поэтому разработка моделей прогноза долговечности бетона должна строиться на методах испытаний морозостойкости, в которых учтены преобладающие механизмы замораживания и разрушения бетона в конкретных условиях эксплуатации и опыте применения бетона в реальных условиях.

В работе [32] приводится обзор более 20 известных методов прогноза морозостойкости бетона, из которого следует, что в большинстве они сложны и не позволяют оперативно контролировать морозостойкость. Наиболее обоснованными по физическому смыслу и обладающими высокой корреляционной связью с базовым методом определения морозостойкости являются методы, основанные на связи со структурными характеристиками бетона.

Основная цель подбора состава – определить минимально необходимые требования к показателям бетона, которые обеспечат проектную марку бетона по морозостойкости. Однако для практики цель подбора – выявить морозостойкий состав, на основании которого будет отрабатываться технологический режим, позволяющий обеспечить морозостойкость бетона в конструкции. Этот принцип заложен в указаниях и рекомендациях по проектированию состава морозостойкого бетона для практического применения [9, 20, 32-34, 37, 62, 63]. Однако они не позволяют однозначно определить состав бетона для конкретной марки по морозостойкости, т.е. отсутствует возможность разделить морозостойкость по маркам.



Многообразие и различная значимость факторов, влияющих на морозостойкость бетона, делают процесс подбора состава бетона трудоемким и сложным. Для определения требуемой марки морозостойкости необходимо определить требования к материалам для бетона (цементу, заполнителям, структурообразующим добавкам, воде), расходу цемента на  $1\text{ м}^3$ , водоцементному отношению, величине содержания воздуха в бетонной смеси, удобоукладываемости и водопотребности, условиям твердения бетона.

Критический анализ методологии определения марки бетона по морозостойкости, приведенный в работе А.М. Подвального [57] показывает, что высокая дифференциация и градация морозостойкости по маркам не имеет смысла из-за высокой чувствительности этой характеристики бетона к изменчивости показателей, определяющих морозостойкость. Для принятой в бетоноведении обеспеченности (доверительной вероятности) равной 0,95 доверительный интервал накрывает 2-4 соседние марки по морозостойкости. Получение достоверного результата возможно при увеличении числа идентичных образцов с 3, что предусмотрено действующим стандартом ГОСТ 10060, до 15-30. Это существенная нагрузка для строительных лабораторий, и вряд ли данное требование будет применяться на практике.

В настоящее время применение действующей методики оценки морозостойкости носит формальный характер. Часто вопрос о соответствии морозостойкости бетона нормативным требованиям возникает только при разрушении бетона конструкций в ранние сроки эксплуатации, как правило, в гарантийные сроки. В этом случае подрядчик возмещает затраты на ремонт. Разрушение бетона в более поздние сроки принимается эксплуатантом как реальный факт, с которым надо мириться, и все расходы по ремонту возмещаются из собственных средств. При этом у эксплуатанта не возникают вопросы о соответствии.

Анализ существующих методов оценки морозостойкости бетона показывает, что явно прослеживается тенденция сокращения дифференциации морозостойкости по маркам, принятой в ГОСТ 10060 [30].

Предлагается делить морозостойкость на 4 класса [64], на 3 [38] или 2 уровня [31] морозостойкости. Однако все предложения основаны на связи со стандартной маркой морозостойкости. Для практики, безусловно, важно знать какие составы бетона обеспечивают долговечность и исключают риск разрушения защитного слоя при эксплуатации в суровых климатических условиях. Поэтому считают, что проектирование морозостойкости бетона целесообразно строить на основе получения изделий особо высокой морозостойкости [31]. В настоящее время решены проблемы придания бетонам морских сооружений стойкости в суровых климатических условиях [10], при этом считают, что получение бетонов особо высокой морозостойкости не требует больших затрат или удлинения сроков строительства [34].

Для проектирования составов бетона по трем уровням морозостойкости необходимо решить следующие вопросы: определить показатели, которые характеризуют каждый уровень морозостойкости; определить метод расчета состава бетона для каждого уровня; определить ускоренный метод оценки соответствия бетона.

Авторы [31] отмечают, что наиболее надежным и точным является прогноз морозостойкости бетона по структурно-морфологическим параметрам его растворной части. Однако отсутствие всех многочисленных функциональных зависимостей между морозостойкостью бетона и факторами, определяющими морозостойкость, обуславливает использование для прогноза установленных корреляционных связей между параметрами структуры цементного камня или их производными и морозостойкостью.

Считают [12, 33], что использовать накопленные знания возможно при формализации структуры бетона и установлении с помощью экспериментальных исследований количественных соотношений между характеристиками структуры и свойствами. Преобладающее число исследователей считают, что параметры структуры пор в основном зависят от степени гидратации цемента. Именно этот показатель в основном

характеризует параметры и структуру условно-замкнутых (резервных) пор. Однозначно установлено, что повышение степени гидратации цемента до начала замораживания бетона увеличивает его морозостойкость, поэтому все факторы, влияющие на степень гидратации цемента, должны оказывать влияние на морозостойкость изделия [32].

#### **1.4. Модели прогноза срока службы бетонных и железобетонных конструкций в условиях морозного и морозосолевого воздействий**

Мировая практика показывает, что экономическая потребность в рациональном использовании ресурсов вызывает новые требования к процессу проектирования сооружений – проектирование по жизненному циклу [1, 2]. В связи с этим возникает потребность в разработке нового подхода к проектированию – по долговечности. Начиная с 2000 г., в США и странах Евросоюза проявляется повышенный интерес к изучению долговечности бетона в агрессивных условиях. RILEM разрабатывает специальные программы для создания математических моделей долговечности для практического применения [2]. Недостаток и необходимость исследований в этом направлении отмечается в работах отечественных специалистов [7, 65]. В связи с этим приобретает особое значение накопление данных о длительной эксплуатации бетона в агрессивных средах, отражающих реальную кинетику коррозионных процессов.

В настоящее время в отечественной практике отсутствуют расчетные модели проектирования конструкций по долговечности. Сложность и многогранность проблемы не позволяют на данном этапе развития теории разработать инженерные модели для практического применения как на этапе проектирования, так и на последующих этапах жизненного цикла конструкций – строительстве и эксплуатации. Современная нормативная база по расчету конструкций для морских и транспортных сооружений [62, 66-68] не предусматривает возможность применения вероятностных методов в

практике проектирования в основном из-за недостатка экспериментальных данных по статической изменчивости расчетных параметров.

Однако на основе теории, экспериментах и практике разработаны основные принципы, позволяющие изготавливать изделия с высокими показателями стойкости в суровых климатических условиях. Это позволило определить показатели долговечности и подходы к их нормированию. За рубежом такой подход к процессу проектирования долговечности называется предписывающим (Prescriptive Specification). Этот принцип учета долговечности бетона заложен в российских нормативных документах, которые касаются защиты строительных конструкций от коррозии [15, 37, 38, 62, 67, 68]. В этих документах отсутствует возможность управлять долговечностью.

Согласно требованиям Еврокода [58], железобетонные конструкции должны быть запроектированы, построены и эксплуатируемы таким образом, чтобы в условиях внешних воздействий они сохраняли надежность и долговечность на протяжении установленного времени без дополнительных расходов на содержание и ремонт. В действующих российских нормах [62, 67], которые разработаны с учетом современного зарубежного опыта защиты строительных конструкций от коррозии, заложены требования к первичной и вторичной защите, позволяющие обеспечить сохранность конструкций в течение 50 лет. Проектирование долговечности, основанное на предписывающей концепции, предусматривает ограничение нормативных требований к показателям, определяющим долговечность. Эти требования установлены в различных документах на проектирование и строительство морских причальных и транспортных сооружений [15, 37, 38, 62, 67, 68].

Подход к обеспечению долговечности, основанный на выполнении нормативных характеристик, предусматривает выбор класса воздействий, соблюдение требований к материалам и бетону конструкций, процедурам укладки, уплотнения и твердения. Предполагается, что при этом

работоспособность бетонных и железобетонных изделий составит не менее 50 лет.

В соответствии с требованиями технического регламента [69] безопасность обеспечивается не только за счет обоснованного назначения нормативных показателей. Важным этапом является процесс оценки соответствия. Данный подход к проектированию конструкций по долговечности не предполагает оценку соответствия изготовленной конструкции. Подход к проектированию по нормативным показателям исключает наличие каких-либо несоответствий на технологических переделах. На практике установленные требования в силу объективных и субъективных причин могут не выполняться, поэтому в эксплуатацию принимаются конструкции, качественные показатели которых по долговечности могут быть существенно занижены по сравнению с проектными. Философия контроля соответствия на основе эксплуатационных характеристик предполагает понимание того, что долговечность может быть повышена только тогда, когда могут быть выполнены измерения соответствующих свойств бетона [2].

Принимая во внимание сложность и многогранность проблемы долговечности, отечественные и зарубежные специалисты считают [2, 10, 12, 70, 71], что ее следует решать комплексно, путем оптимизации технических свойств материалов на основании учета их работы в динамике с реальными процессами, происходящими в конструкции под воздействием окружающей среды.

Практический опыт показал, что проектирование долговечности, основанное на предписывающей концепции, не позволяет учитывать многообразие качественных показателей используемых для бетонов материалов, состава бетона, условий его изготовления и эксплуатации. Этот подход к проектированию не позволяет использовать новые материалы с учетом конкретных условий строительства.

Это явилось основной причиной в необходимости разработки нового подхода к учету долговечности конструкций при проектировании – концепция проектирования с учетом эксплуатационных характеристик (performance-based design). Концепция проектирования долговечности на основе эксплуатационных характеристик предусматривает количественный прогноз долговечности (или срока службы) исходя из преобладающих условий воздействия и измеренных показателей долговечности.

Переход от проектирования долговечности по нормативным требованиям к проектированию на основании эксплуатационных характеристик является многоэтапным. Для разработки базового документа, позволяющего осуществлять проектирование по эксплуатационным характеристикам, в работе [2] предложена основа, в которой предусмотрены следующие семь этапов:

- определить классы воздействия, связанные с механизмом(-ами) износа;
- разработать методологию количественного проектирования, включающую определение срока службы;
- разработать методы испытаний, которые относятся к входным параметрам методики проектирования;
- создать предварительные критерии соответствия и провести калибровку с учетом традиционных решений;
- установить область применимости теста;
- обеспечить производственный контроль и приемочные испытания;
- провести полномасштабные испытания и долгосрочный мониторинг для подтверждения соответствия требованиям.

Следует отметить, что только для решения задачи связанной с разработкой математической модели определения расчетного срока службы требуется большой объем экспериментальных данных. В работе [10] предложена схема для поэтапного решения вопроса о разработке модели для прогноза срока службы. В ней выделено 16 этапов.

Для практического применения подхода, основанного на эксплуатационных характеристиках, в требованиях на долговечность и для оценки срока службы необходимо разработать следующие элементы [2]: критерии предельного состояния; критерии назначения срока службы; модели разрушения; тесты на соответствие; стратегию технического обслуживания и ремонта; систему контроля качества.

Считают [2], что подход, основанный на эксплуатационных характеристиках, является важным достижением в проектировании железобетонных изделий по долговечности. Однако развитие этой концепции ограничивает то обстоятельство, что различные процессы разрушения, влияющие на структуры бетона, в настоящее время не полностью поняты во всех необходимых деталях, а методы испытаний, используемые в лаборатории, не всегда отражают реальные условия. Чем больше несоответствие между эксплуатационными и лабораторными условиями, тем больше неопределенность в оценке долговечности бетонной конструкции. Сложность проблемы в ее многообразии не позволяет найти простые и быстрые решения. Поэтому представляет интерес частные решения, которые могут служить базой для достижения поставленной цели.

Проектирование сооружений по жизненному циклу [69] требует от проектировщиков обоснования назначаемых нормативных показателей, а от строителей надежности реализации проектных показателей, которые должны гарантировано обеспечивать сроки эксплуатации. Оценка качества бетона по контрольным образцам не является надежной, поскольку дефекты, влияющие на морозостойкость бетона, могут возникнуть на всех технологических этапах изготовления конструкций [10, 32, 34]. Поэтому до настоящего времени вопрос переноса лабораторных испытаний на реальное изделие остается наиболее важным в проблеме прогнозирования долговечности. Очевидно, лабораторные испытания морозостойкости бетона будут представлять практический интерес, когда они позволят характеризовать стойкость и долговечность конструкций в реальных условиях эксплуатации.

В 70-ые годы прошлого столетия для прогнозирования долговечности бетона в портовых сооружениях проводились исследования для установления связи между стандартными и природными циклами, чтобы посредством переходных коэффициентов оценивать реальную суровость внешних воздействий [72-74]. На основании лабораторных исследований и натурных обследований сооружений В.С. Гладков и Ф.М. Иванов [73] предложили оценивать условий службы бетона в конструкциях числом расчетных циклов  $N_p$ :

$$N_p = \frac{K_c}{K_1} \cdot N_{пр}, \quad (1.3)$$

где:  $K_c$  – коэффициент суровости природных циклов;  $K_1$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры среды при оттаивании;  $N_{пр}$  – число природных циклов замораживания и оттаивания в год.

Современная концепция проектирования стойких бетонов для морских и транспортных сооружений основана на оценке суровости температурных воздействий и циклов замораживания в зоне переменного уровня. В настоящее время для обеспечения стойкости бетона в условиях морозного воздействия предусмотрены нормативные требования к бетону по морозостойкости [62, 67]. Марка бетона по морозостойкости должна назначаться в зависимости от климатических условий района строительства и числа расчетных циклов (смен) попеременного замораживания и оттаивания в течение года (по данным долгосрочных наблюдений), с учетом эксплуатационных условий. Требования по морозостойкости предъявляются только к бетону, который находится в зоне переменного уровня воды, и наружному надводному бетону.

В связи с тем, что в конце прошлого века контроль долговечности бетонных конструкций стал приобретать все большее значение на этапах проектирования и обслуживания этих сооружений, в 1996 г. RILEM (Международный союз испытательных и исследовательских лабораторий материалов и конструкций) подготовил Отчет технического комитета 130-CSL по расчету долговечности бетонных конструкций [3]. Этот отчет



представляет собой первую систематическую попытку ввести в структурное проектирование как общую теорию структурной надежности, так и существующие расчетные модели для наиболее распространенных процессов деградации бетона. Цель комиссии RILEM состояла в том, чтобы разработать теоретическую основу и методику расчета долговечности бетонных конструкций для выбора подходящих моделей долговечности. Это позволяло использовать результаты исследований материалов для проектирования.

Обширные исследования 70-х и 80-х годов прошлого века, посвященные долговечности бетона, дали достоверную информацию о факторах, влияющих на стойкость бетона при морозном воздействии. Это позволило разработать требования к технологии бетона высокой морозостойкости. Однако проектирование бетона по жизненному циклу должны включать в себя не только непосредственные затраты на строительство, но также расходы на техническое обслуживание и ремонт. Поэтому проектировщик должен быть в состоянии обосновать требования срока службы. Для этого требуется простая модель долговечности, показывающая работоспособность или срок службы в зависимости от технических характеристик строительных материалов. Многие факторы внешних воздействий влияют на механизмы разрушения бетона, но их точное влияние трудно предсказать, поскольку они сильно различаются в зависимости от региона. Поэтому важно показать, как результаты исследований бетона могут быть перенесены на проектирование сооружений.

Новый подход к проектированию долговечности потребовал разработку новых идей в дальнейших исследованиях процессов деградации и их расчетных моделей [12, 32, 40, 75-81]. Расчеты долговечности позволяют не только варьировать приоритеты материалов и конструктивных факторов, но также получать численные значения факторов для предполагаемого срока службы. Идея отчета RILEM состояла в представлении методологии расчета долговечности таким образом, чтобы она могла быть объединена с традиционным механическим проектированием. В этой процедуре

используются текущие результаты в отношении безопасности при статической, усталостной и ударной нагрузке.

Теория проектирования долговечности в принципе основана на теории безопасности (или надежности), которая используется в проектировании изделий и конструкций. Однако при использовании теории безопасности для проектирования долговечности включается параметр времени. Это позволяет рассматривать деструкцию материала как существенную часть проблемы. Поэтому долговечность должна быть связана со сроком службы сооружения, т.е. быть количественно определяемым свойством.

Метод расчета долговечности может быть детерминированным, стохастическим или заключаться в коэффициенте запаса долговечности на срок службы.

**В детерминированном расчете** на долговечность нагрузка, сопротивление и срок службы используются как детерминированные величины. Распределение этих функций не рассматривается. По принципу работы расчетная формула записывается в виде:

$$R(t_g) - S(t_g) > 0, \quad (1.4)$$

где:  $t_g$  – целевой срок службы.

Нагрузка  $S$  или сопротивление  $R$ , или и то, и другое являются функциями, зависящими от времени. В качестве этих функций используются модели деградации и работоспособности. В эти функции включены такие параметры, как размеры конструкции, технические характеристики материалов и коэффициенты воздействия окружающей среды.

Соответствующая расчетная формула записывается по принципу срока службы следующим образом:

$$t_L - t_g > 0, \quad (1.5)$$

где:  $t_L$  – функция срока службы. В качестве этой функции используются модели срока службы, включающие расчетные параметры.

Проектирование конструкций выполняется путем выбора соответствующей комбинации значений проектных параметров таким образом, чтобы выполнялись условия уравнений (1.4) и (1.5).

*При стохастическом расчете* на долговечность учитываются распределения нагрузки, реакции и срок службы. Многофакторная зависимость деградации материала в конструкции предопределяет необходимость использовать не только средние значения характеристик, определяющих долговечность, но и распределение.

Исходя из теории вероятности отказа и срока службы, простейшая модель для описания события «отказа» включает переменную нагрузки  $S$  и переменную сопротивления  $R$ . В принципе переменные  $S$  и  $R$  могут быть любыми величинами и выражаться в любых единицах. Единственное требование – они должны быть соизмеримы. Отказ происходит при условии  $R < S$ . При этом вероятность отказа  $P_f$  может происходить внезапно:

$$P_f = P(R < S), \quad (1.6)$$

либо в течение периода эксплуатации  $\tau$ , когда величины  $R$  и  $S$  изменяются:

$$P_f(t) = P[R(\tau) < S(\tau)]. \quad (1.7)$$

Согласно выражению (1.7) вероятность отказа непрерывно увеличивается со временем, как схематически представлено на рис. 1.1. В момент времени  $\tau = 0$  распределение плотностей нагрузки  $S$  и сопротивления  $R$  находятся далеко друг от друга, поэтому вероятность отказа мала.

Если рассматривать функцию  $P_f(t)$  как функцию нормального распределения, то со временем распределения сближаются, образуя перекрывающуюся область увеличивающегося размера. Проблема может быть решена, если известны распределения нагрузки и сопротивления.

*Метод запаса прочности на срок службы* рекомендуют применять, когда использование метода стохастического проектирования затруднено из-за сложности формул для расчета нагрузки, сопротивления и срока службы. Хотя метод основан на теории безопасности и надежности, формулировка процедуры проектирования возвращается к детерминированной форме. Это

возможно за счет изменения требования целевого срока службы на соответствующее требование проектного срока службы.

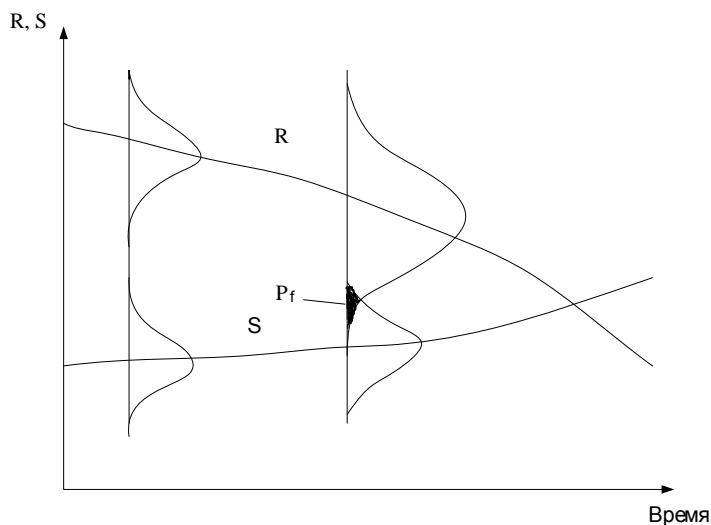


Рис. 1.1. Увеличение вероятности отказа. Иллюстративная презентация. Перекрывающаяся область иллюстрирует вероятность отказа

На практике расчетный срок службы определяется путем умножения целевого срока службы на коэффициент безопасности срока службы:

$$t_d = \gamma_t \cdot t_g, \quad (1.8)$$

где:  $t_d$  – расчетный срок службы;  $\gamma_t$  – коэффициент безопасности по сроку службы;  $t_g$  – целевой срок службы.

Затем расчетные формулы могут быть записаны с применением принципа рабочих характеристик или принципа срока службы:

$$\begin{aligned} R(t_d) - S(t_d) &\geq 0, \\ t_L - t_g &> 0. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Значение запаса прочности на срок службы зависит от максимально допустимой вероятности отказа. Коэффициент запаса прочности на срок службы должен быть откалиброван в соответствии с результатами методов стохастического проектирования.

На основе данного подхода разработан ряд моделей долговечности бетона в условиях морозного воздействия [3]. Например, модель долговечности, основанная на уменьшении прочности:

$$f_{ck}(d) = f_{ck} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{d}{H} \right)^n \right] \right\}, \quad (1.10)$$

где:  $f_{ck}(d)$  – характеристика прочности бетона на сжатие на глубине  $d$ ;  $f_{ck}$  – характеристика прочности бетона на сжатие из неповрежденного бетона;  $d$  – глубина от поверхности;  $H$  – глубина влияния;  $n$  – индекс, относящийся к числу ПЗО (или время).

Модель для разрушения бетона, предложенная Весикари, основана на скорости разрушения поверхностного слоя:

$$r = c_{env} \cdot c_{cur} \cdot c_{age} \cdot a^{-0,7} (f_{ck} + 8)^{-1,4}, \quad (1.11)$$

где:  $r$  – скорость разрушения (потери структурно эффективного бетона, мм/год),  $c_{env}$  – коэффициент влияния окружающей среды;  $c_{cur}$  – коэффициент, зависящий от режима твердения;  $c_{age}$  – коэффициент старения;  $a$  – содержание воздуха (%);  $f_{ck}$  – характеристика кубической прочности при сжатии на 28 день (МПа).

Обзор литературных данных показывает [3, 76, 82], что в настоящее время широко исследуется направление моделирования срока службы бетонных изделий и конструкций в условиях морозного воздействия на основе изучения закономерности водонасыщения бетона в результате действия циклов ЗО. Теоретические положения о механизмах морозного разрушения бетона [13] и результаты экспериментальных исследований показывают, что степень насыщения бетона может увеличиваться под действием циклов ЗО [75-77].

Fagerlund в 1972 г. разработал специальный метод тестирования, который называется: «Метод критической степени насыщения» ( $S_{CR}$ -метод) [35]. Этот метод сочетает в себе замораживание-оттаивание и капиллярное водопоглощение. Метод, первоначально предложенный для оценки морозостойкости бетона, при дальнейших исследованиях показал возможность его использования для прогноза срока службы в условиях морозного воздействия. В основе концепции проектирования морозостойкости заложен подход, принятый для проектирования механической безопасности

сооружений. Критическое состояние влажности соответствует разрушающей нагрузке при силовом воздействии на материал, а фактическая влажность в реальном изделии соответствует фактической силовой нагрузке. Концепция основана на следующих положениях. Фактическое содержание влаги в элементарной ячейке  $S_{ACT}$  конструкции со временем меняется. Важно знать содержание влаги непосредственно перед замораживанием. Элементарная ячейка разрушится полностью при критической степени насыщения  $S_{CR}$ , т.е. повреждение составляет 100 % при  $S_{ACT} > S_{CR}$ . Разрушение в бетоне происходит при первом превышении критического уровня. На этой основе Fagerlund [48] разработал модели прогноза срока службы бетона, используя детерминистский и стохастический подходы.

**Детерминированный прогноз срока** службы разработан на основе капиллярного водопоглощения. Основным критерием повреждения бетона от мороза является условие:

$$S_{ACT} \geq S_{CR}, \quad (1.12)$$

где:  $S_{ACT}$  – фактическая степень насыщения;  $S_{CR}$  – критическая степень насыщения.

Риск повреждения от замерзания как функция времени оценивается с помощью эксперимента по капиллярному поглощению, которое описывается уравнением:

$$S_{cap} = S_b + e \cdot t^d, \quad (1.13)$$

где:  $S_b$  – степень насыщения, достигнутая в точке разрыва [20];  $c$ ,  $d$ ,  $e$  – коэффициенты, зависящие от материала.

Максимальный (потенциальный) срок службы при непрерывном водопоглощении определяется по выражению:

$$t_{lif. pot} = [(S_{CR} - S_b)/e]^{1/d}. \quad (1.14)$$

Сравнивая этот потенциальный срок службы  $t_{lif. pot}$  с эквивалентным временем адсорбции  $t_{equiv}$ , можно оценить срок службы (рис. 1.2):

$t_{lif. pot} > t_{equiv}$  – повреждений не может произойти, т.е. срок службы =  $\infty$ ;

$t_{lif. pot} < t_{equiv}$  – повреждение произойдет, но невозможно определить в какой период.

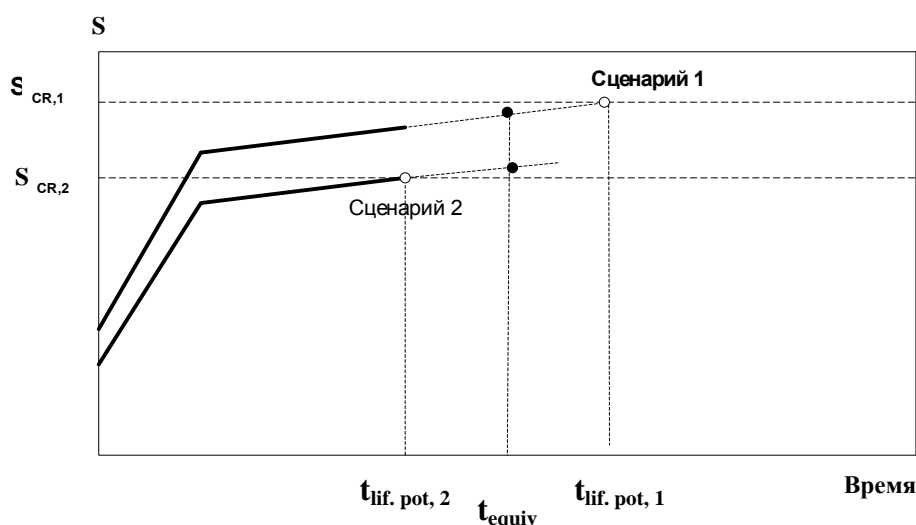


Рис. 1.2. Материал в среде, которая дает определенное эквивалентное время капиллярного поглощения. Два вида бетона: 1 – с «вечным» сроком службы; 2 – с коротким сроком службы

**Стохастический подход** к прогнозированию на основе капиллярного водопоглощения позволяет конкретизировать определение безопасного срока службы. Предполагая, что критическая степень насыщения  $S_{CR}$  и фактическая степень насыщения  $S_{ACT}$  являются стохастическими переменными, их можно описать средним значением и стандартным отклонением (рис. 1.3). Фактическое распределение устанавливается экспериментально на основании определения  $S_{CR}$  при испытаниях на замораживание и оттаивание и  $S_{ACT}$  по испытаниям на адсорбцию.

Вероятность повреждения рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned}
 P \{ \text{повреждение от замерзания} \} &= P \{ S_{ACT} > S_{CR} \} = \\
 &= \int_0^{\infty} F(S_{CR}) \cdot f(S_{ACT}) \cdot dS.
 \end{aligned}
 \tag{1.15}$$

Как видно, срок службы может быть рассчитан, если с высокой точностью можно предсказать будущее водопоглощение в реальных условиях. Автор метода [20] считает, что это можно определить экспериментально по результатам измерения капиллярного водопоглощения.

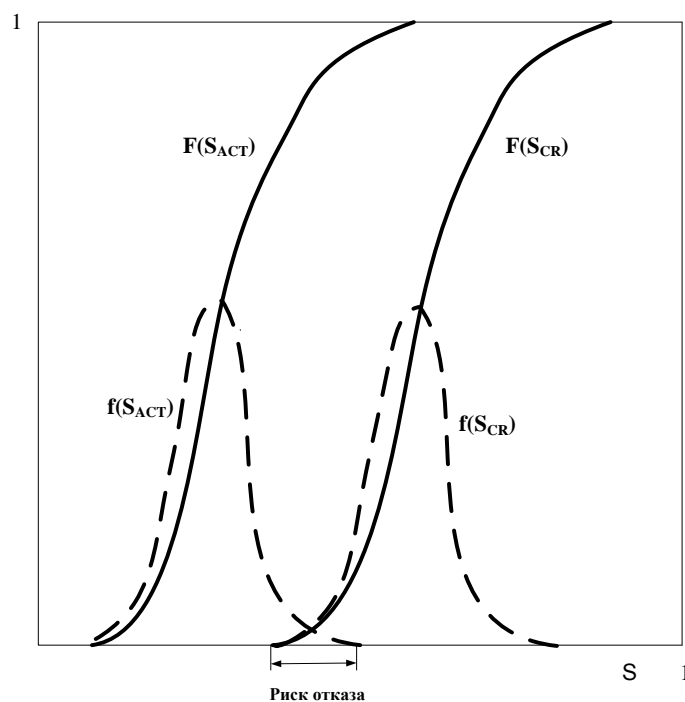


Рис. 1.3. Частота  $f$  и функции  $F$  распределения критических  $S_{CR}$  и фактических  $S_{ACT}$  степеней насыщения. Площади под частотными кривыми = 1

Риск повреждения от замерзания можно рассчитать, если известны статистические распределения критического и реального содержания воды. Определив наивысший допустимый риск, можно рассчитать потенциальный срок службы.

### 1.5. Постановка задач исследования

Опыт эксплуатации портовых сооружений показывает, что в одних и тех же условиях воздействия морской воды бетоны могут быть стойкими, когда в них не наблюдается признаков разрушения в течение длительного времени, и нестойкими, когда признаки разрушения наблюдаются после непродолжительного срока эксплуатации. Это является подтверждением того, что явно недостаточно существующих методов расчета, конструирования и организационно-технологических мер по обеспечению стойкости конструкций из бетона. Расчет долговечности путем учета влияния всех факторов, определяющих стойкость бетона, является сложным для практического применения. Многоэтапная технология изготовления бетонных конструкций не исключает нарушений или отступлений от



оптимальных режимов на отдельных технологических переделах, которые могут стать причиной снижения морозостойкости и, как следствие, понижения их долговечности.

В настоящее время накоплен значительный опыт строительства с применением различных технологий. Однако наибольшую эффективность можно получить лишь при разработке технологий для конкретных условий эксплуатации сооружений, позволяющих получать изделия необходимой стойкости в этих условиях, и методов прогноза срока службы.

При стандартных испытаниях на морозостойкость рассматривается система «материал – среда», в которой «среда» имеет нормированные параметры. Это позволяет за счет варьирования показателей материала оценивать его стойкость бетона при стандартных условиях испытания. В системе «материал – конструкция – среда», т.е. в реальных условиях «среда» может принципиально изменить механизмы замораживания и разрушения бетона. Поэтому целесообразно изучить накопленный опыт строительства сооружений в агрессивных средах класса XF4, чтобы установить логическую связь в системе «климатические условия – микроклимат сооружений – структура бетона – долговечность» для разработки модели прогноза долговечности бетона в конструкциях.

В соответствии с поставленными целями диссертационной работы **во второй главе** представлены экспериментальные методы и методики получения данных, подготовки образцов к исследованию и последующей обработки результатов.

**В третьей главе** охарактеризованы основные воздействия окружающей среды и условия эксплуатации бетонных конструкций в сооружениях на о. Сахалин. Описаны виды и характер разрушения бетона в сооружениях, расположенных в зоне переменного уровня воды. Изучено состояние конструкций для морских портовых сооружений на Сахалине, изготовленных с применением различных технологий бетонных работ: традиционной и современной.

**В четвертой главе** диссертации проведена разработка математической модели теплообменных процессов цикла «замораживание – оттаивание» в железобетонной конструкции гидротехнического сооружения. Для математического описания поставлена физико-математическая задача нестационарного теплопереноса, в которой решение краевой задачи нестационарной теплопроводности проводилось методом интегрального преобразования Лапласа. С помощью разработанных уравнений смоделирована динамика теплопереноса на стадии охлаждения железобетона и теплообменные процессы в двухслойном теле: «замерзшая – талая» зоны.

**Пятая глава** посвящена проектированию долговечности бетонных изделий для морозосолевого воздействия. Установлены критерии долговечности бетона в условиях многоциклического замораживания и оттаивания и для случая длительного замораживания. Показаны направления реализации проектных решений по долговечности бетона на этапе строительства. Проведено прогнозирование долговечности бетонных конструкций в морской воде в условиях замораживания и оттаивания с учетом разработанных алгоритмов принятия решения при оценке соответствия бетонных конструкций требованиям долговечности.

**В заключении** изложены основные результаты диссертационной работы, представляющие научную и практическую ценность, а также перспективы для дальнейших исследований по тематике диссертационного исследования.

## ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1. Объекты исследований

В таблице 2.1 приведены основные сооружения, построенные на Сахалине за период с 1925 по 2018 гг. Общий вид портовых сооружений показан на рис. 2.1-2.5.

Таблица 2.1

Морские гидротехнические сооружения, построенные на о. Сахалин за период 1925-2018 гг.

Шифр объекта	Тип сооружения и конструктивное решение	Год и район строительства
К1	Причальные сооружения (пирс) из массивов-гигантов	1927-40 гг., г. Корсаков
Х2-1	Берегоукрепительные сооружения морской железнодорожной переправы Ванино-Холмск из тетраподов массой 5 т	1970-73 гг., г. Холмск
Х2-2	Причальные сооружения базы флота «Сахалинрыбпрома» из монолитного бетона, сооружение возводилось «насухо»	1971-73 гг., г. Холмск
К2	Берегоукрепительные сооружения территории нефтебазы	1993-95 гг., г. Корсаков
К3-1	Берегоукрепительные сооружения вспомогательного пирса завода СПГ из гексабитов массой 5 т	2002-2004 гг., п. Пригородное, Корсаковский район
К3-2	База аварийно-спасательная завода СПГ, волноотбойная стенка из массивных блоков. Волноотбойная стенка из сборных железобетонных блоков массой 40 т и гексабитов массой 5 т	2004-2006 гг., п. Пригородное, Корсаковский район
У3	Причальные сооружения (реконструкция), верхнее строение из монолитного бетона	2008-2009 гг., г. Углегорск
Н3	Набережная, верхнее строение из монолитного бетона	2007-2008 гг., г. Невельск
К3-3	Причальные и оградительные сооружения, верхнее строение из монолитного бетона	2016-2018 гг., г. Корсаков
Х3-3	Оградительное сооружение из тетраподов массой 20 т	2016-2017 гг., г. Холмск.

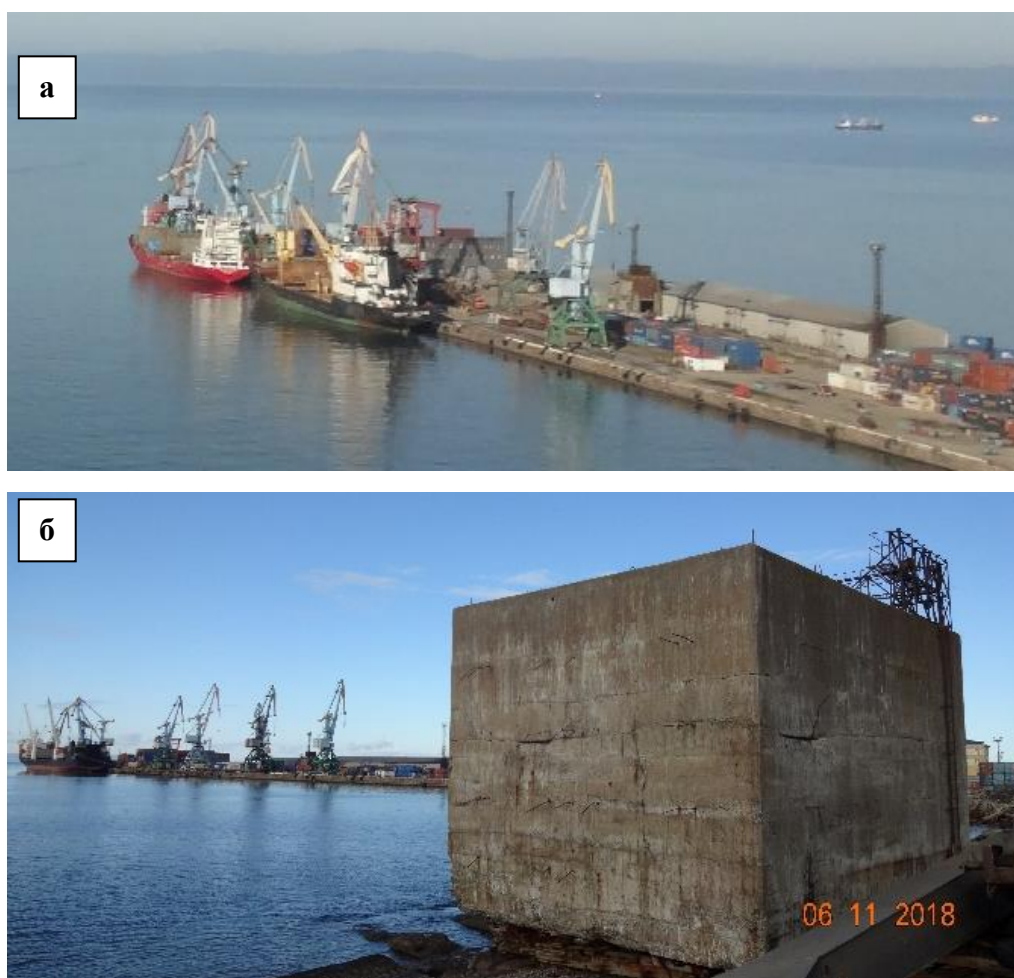


Рис. 2.1. Общий вид сооружения К1: а) общий вид пирса из массивов-гигантов (сооружен в 1925-30 гг.); б) конструкция массива-гиганта перед установкой в сооружение (изготовлен в 1940 г.)

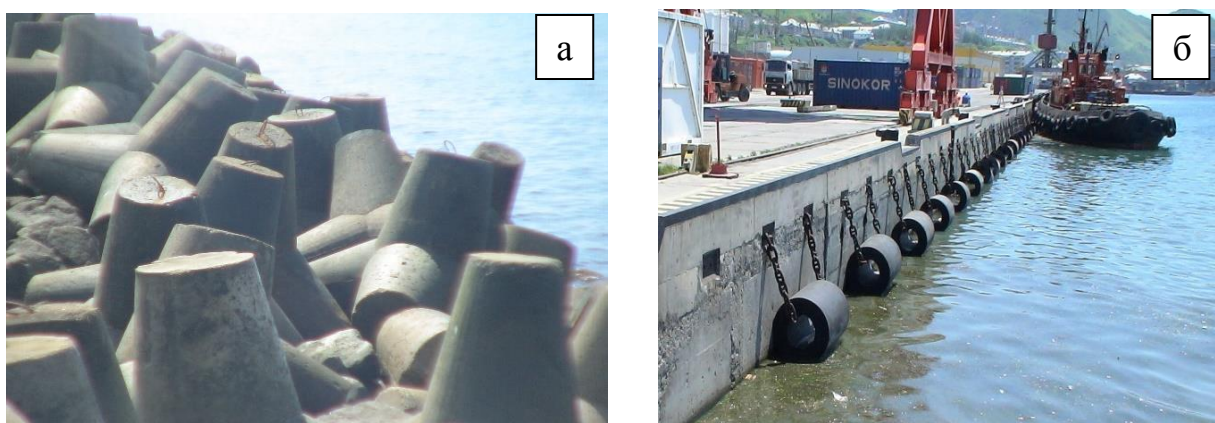


Рис. 2.2. Берегоукрепительное сооружение Х2-1 из фасонных массивов-тетраподов (а), причальная стенка объекта Х2-2 из монолитного бетона (б)



Рис. 2.3. Берегоукрепление корневой части пирса фасонными массивами (гексабитами) на объекте КЗ-1



Рис. 2.4. Волноотбойная стенка из сборных фасонных элементов на объекте КЗ-3 (строительство: 2006-2007 гг.)



Рис. 2.5. Надстройка причальной стенки из монолитного бетона сооружение КЗ-3 (строительство: 2016-2018 гг.)

Причалные сооружения в г. Корсаков выполнены из сборно-монолитных конструкций. Подводная часть сооружения возведена из сборных конструкций – массивов-гигантов (рис. 2.1), которые изготавливались с применением местных материалов и традиционных технологических приемов, характерных для первой половины прошлого столетия, т.е. из обычного (классического) бетона.

Строительство объектов Х2-1, Х2-2 велось с применением специальных технологических правил [1], которые предусматривали для повышения морозостойкости бетона ограничения по составу бетона и технологическим свойствам бетона. В этот период велось строительство портовых сооружений из монолитного бетона и с применением конструкций заводского изготовления. На рис. 2.2 представлены общие виды сооружений.

Берегоукрепительные сооружения морской железнодорожной переправы Ванино-Холмск (объект Х2-1, таблица 2.1) возводили из тетраподов заводского изготовления.

Причалные сооружения объекта Х2-2 возводились из монолитного бетона. Объект возводился по технологии «насухо», которая исключала проведение подводного бетонирования. Причальная стенка на всю высоту – 10 м, возводилась по обычной технологии монолитного бетона. Для этого, будущая акватория порта отгораживалась дамбой от Татарского пролива, которая разбиралась после устройства бетонной причальной стенки и дноуглубления акватории порта до проектной отметки.

Оградительные и берегоукрепительные сооружения на Сахалине выполнены из фасонных массивов (рис. 2.2. и рис. 2.3). На объектах, построенных в период с 70-ых до 90-ых годов прошлого столетия, применяли тетраподы массой 1,5-5,0 т, начиная с 2000-го года стали применять тетраподы массой 20 т и гексабиты массой 5 т.

Портовые сооружения из сборных, монолитных и сборно-монолитных конструкций (рис. 2.3 и рис. 2.4) возводились строительными

организациями, в структуре которых отсутствовали подразделения лабораторного и строительного контроля.

На западном побережье о. Сахалин (г. Холмск) строительство причальной стенки выполнено полностью из монолитного бетона (рис. 2.2-б). Монолитный бетон использовали для возведения верхнего строения набережных (рис. 2.5).

Сборные конструкции применяли в основном для строительства оградительных и берегоукрепительных сооружений. Для этих сооружений использовали фасонные массивы весом от 1,5 до 20 т (рис. 2.3 и рис. 2.6). Форма конструкций массивов – это тетраподы и гексабиты.



Рис. 2.6. Конструкции портовых сооружений: а) элемент волноотбойной стенки для объекта КЗ-3 (строительство 2006-2007 гг.); б) фасонный массив (тетрапод) массой 20 т для устройства волнолома (объект ХЗ-3, строительство 2016-2017 гг.)

Массивные конструкции весом до 40 т применяли для строительства волноотбойных стенок на объекте КЗ-3 (рис. 2.6-а). Сборные конструкции из массивов-гигантов использовали для возведения подводной части сооружения К1 (рис. 2.1).

Сборно-монолитные конструкции применяли для причальных сооружений, когда необходимо было возводить сооружение с применением бетонных конструкций в подводной и надводной зоне. Подводные участки сооружений возводили из пустотелых массивных блоков различных размеров. Для набережных применяли сравнительно небольшие пустотелые массивы, для причалов применяли массивы-гиганты. Надстройки

возводились из монолитного бетона. Внешний вид конструкций причалов представлен на рис. 2.7.

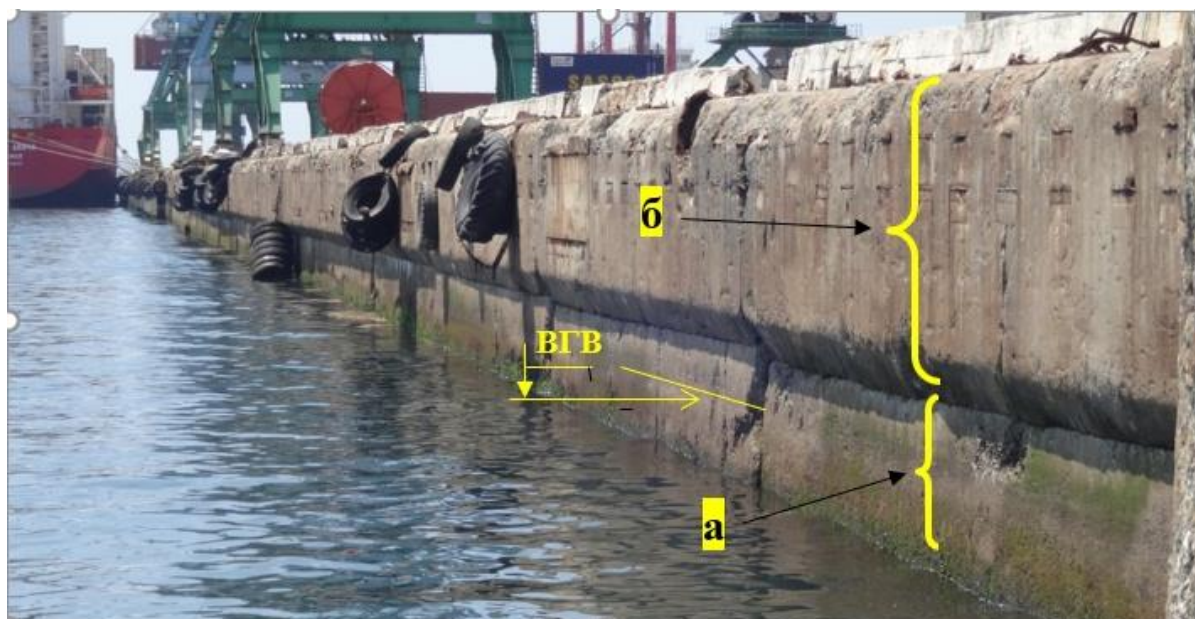


Рис. 2.7. Сборно-монолитная конструкция причальной стенки сооружения К1: а) массив-гигант (5х6х7 м), расположенный в подводной зоне и в зоне прилива воды; б) монолитная конструкция надстройки выше верхнего уровня прилива

Для детального исследования причальных сооружений, построенных в 20-ых годах прошлого века, выбран объект К1, который эксплуатируется до настоящего время. Подводная часть сооружения выполнена из массивов-гигантов, а надстройка из монолитного бетона. Массив-гигант представляет полую ячеистую конструкцию размером в плане 5х6 м и высотой 7 м, толщина стенок составляет 0,3 м. Массивы-гиганты изготавливались на берегу, а затем по слипу спускали в воду и буксировали на место установки в створ причала (рис. 2.1-б). Затем конструкцию затапливали и для обеспечения устойчивости ее ячейки заполняли камнем или тощим бетоном. После установки массива-гиганта производилось возведение надстройки из монолитного бетона. Технология строительства позволяла практически выполнять все бетонные работы «насухо» и обеспечивать твердение бетона в естественных условиях при положительной температуре воздуха. Как видно, за счет применения при строительстве объекта К1 сборно-монолитной технологии были исключены сложные бетонные работы в подводной зоне и в



зоне действия прилива. Надстройки причальных сооружений и набережных выполнены в основном из монолитного бетона и железобетона.

## **2.2. Методология исследований**

Исходя из поставленной в работе цели, методология исследований основана на системном подходе к исследованию проблемы долговечности бетона при морозном воздействии с учетом его жизненного цикла. Для объективной оценки влияния различных факторов на кинетику деградации бетона в условиях морозного воздействия принято исследовать систему: «условия эксплуатации – состав бетона – технология изготовления – свойства бетона – условия эксплуатации – долговечность».

В нашем случае методология изучения долговечности бетона основана на исследовании влияния морозного воздействия на бетон конструкций в реальных условиях эксплуатации.

К числу основных требований для научных исследований относят объективность, воспроизводимость, доказательность и точность. В целях практического применения результатов исследований для технической и информационной совместимости, сопоставимости результатов исследований (испытаний) и измерений, технических и экономико-статистических данных важное место занимает терминология, принятая в сфере научных исследований.

Методологически в исследовании бетона с позиции его долговечности целесообразно принять за основу существующие методы расчета долговечности. Принципиальная схема связи подсистем в системе проектирования долговечности бетона по действующим нормативным документам представлена на рис. 2.8.

В представленной схеме для каждой подсистемы установлены критические показатели (ограничения) и их значения для получения стойких бетонов в условиях морозного воздействия. Многолетний опыт эксплуатации конструкций из бетона в агрессивных средах показал, что при обеспечении в

подсистемах 2-5 значений критических показателей, соответствующих требованиям подсистемы 1, срок службы должен составить не менее 50 лет [4, 5]. Однако, наблюдаемые разрушения бетона после непродолжительного срока службы, свидетельствуют о необходимости исследования всех подсистем или тех подсистем, в которых наиболее вероятны нарушения критических показателей. Не исключено, что критические показатели, принятые в подсистемах, не в полной мере характеризуют долговечность бетона в конкретных условиях эксплуатации.



Рис. 2.8. Схема-алгоритм проектирования долговечности бетона для эксплуатации в морской воде в условиях замораживания-оттаивания [4, 5]

Анализ литературных данных дает основание считать, что наименее изучены критические показатели, характеризующие подсистемы 1 и 5, т.е. условия эксплуатации и прогноз долговечности бетона. Исходя из этого, в настоящей работе приняты методы исследований, позволяющие выявить критические показатели, наиболее полно отражающие работу бетона в условиях зоны переменного уровня воды. В подсистеме 1, которая характеризует условия эксплуатации, в качестве показателей, определяющих агрессивность воздействующей среды, приняты нормируемые показатели по

СП 28.13330 [67]: степень насыщения бетона морской водой, характер контакта бетона с морской водой и температура наружного воздуха в зимний период. Из перечисленных нормируемых показателей количественное значение имеет только показатель температуры воздуха в зимний период при действии знакопеременных температур.

В соответствии с основными положениями теорий морозного разрушения для прогноза кинетики разрушения бетона важно знать механизм его замораживания. Основанием для этого является доказанный факт, что показатели, характеризующие условия эксплуатации, определяют механизмы замораживания и разрушения бетона. Следовательно, совершенствование технологии бетона возможно только на основе четкого представления о факторах, включающих в работу механизм разрушения бетона. Однако по критическим показателям, принятым в подсистеме 1, нельзя оценить механизм замораживания бетона, поэтому нельзя объективно установить критический показатель, влияющий на долговечность бетона в других подсистемах.

В связи с этим методологически в работе выделены натурные и лабораторные исследования. Натурные обследования предусматривали визуальную оценку состояния бетона по внешним признакам и оценку физико-механических свойств бетона в конструкциях.

Выделены объекты и предметы исследований, которые, исходя из общепринятых представлений о долговечности бетона, оказывают решающее влияние на стойкость бетона в условиях морозного воздействия. Объектами исследований явились конструкции из бетона, подверженные морозному воздействию при различной степени водонасыщения. Предметами исследований являлись показатели внешних воздействий на конструкции, которые оказывают наиболее значимое влияние на стойкость бетона в условиях морозного воздействия.

В целях практического применения результатов исследований для технической и информационной совместимости, сопоставимости результатов исследований (испытаний) и измерений, технических и экономико-

статистических данных в работе предусмотрено по возможности использовать терминологию, методы исследований и испытаний, изложенные в нормативных документах.

### **2.3. Методы натуральных исследований**

Натурные исследования предусматривали оценку состояния бетона в конструкциях по внешним признакам и оценку физико-механических показателей качества бетона.

Объектами при натуральных исследованиях являются бетонные конструкции портовых и транспортных сооружений, работающие в природно-климатических условиях побережья юга о. Сахалин.

Методика обследования строилась на основе принципов, заложенных в действующих нормативных документах и заключающихся в разделении работы на три этапа [83, 84]: подготовка к проведению обследования; предварительное визуальное обследование; детальное инструментальное обследование.

Подготовительные работы проводились с целью анализа природно-климатических условий в районе эксплуатации сооружений, конструктивных решений и технологии бетонных работ.

Визуальное обследование проводилось с учетом результатов работы, проведенной на подготовительном этапе, и предусматривало: изучение работы конструкций в зимний период; оценку состояния бетона по внешним признакам в зоне переменного уровня воды; анализ возможных причин разрушения бетона; систематизацию выявленных разрушений по характерным признакам; выбор сооружений для детального обследования.

Методика изучения работы конструкций в зоне переменного уровня воды основана на постоянном (ежедневном) мониторинге состояния бетона в зимний период.

Детальное обследование проводилось на трех бетонных сооружениях и включало: исследование температурного режима бетона в зоне переменного уровня воды; отбор проб бетона из конструкций с целью дальнейших

лабораторных испытаний; определение механических и физических свойств бетона непосредственно в конструкциях.

Методика определения температурного режима бетона в конструкциях предполагала применение специальных датчиков, которые устанавливались в тело бетона для фиксации температуры на протяжении всего зимнего периода в различных участках конструкции.

Свойства бетона в конструкциях определяли неразрушающими и разрушающими методами. Методика натурных исследований предполагала проведение испытаний бетона на трех участках зоны переменного уровня воды: участок прилива, вертикальный и горизонтальные участки обрызгивания волнами.

При детальном обследовании проводилось определение прочности, морозостойкости, водонепроницаемости, водопоглощения, пористости, вещественного состава бетона.

Прочность и водонепроницаемость бетона определяли неразрушающими методами непосредственно в конструкциях и разрушающими – по испытанию образцов-цилиндров, изготовленных из выбуренных кернов (рис. 2.9).



Рис. 2.9. Образцы проб бетона из сооружения: а) керны из конструкций диаметром 95 мм и длиной до 300 мм; б) образцы-цилиндры диаметром 95 мм и высотой 100 мм для определения механических и физических свойств бетона

Прочность бетона в конструкции определяли прямым неразрушающим методом по ГОСТ 22690 [85] и разрушающим – по образцам, отобраным из конструкций, в соответствии с ГОСТ 28570 [86].

Непосредственно в конструкциях прочность бетона определяли методом отрыва со скалыванием прибором ОНИКС-1.0С. Визуализация процессов представлена на рис. 2.10. В лаборатории прочность бетона определяли по образцам-цилиндрам (рис. 2.9-б) на прессе.



Рис. 2.10. а) и б) процесс определения прочности методом отрыва со скалыванием; в) и г) процесс определения водонепроницаемости по воздухопроницаемости бетона в конструкции прибором ВИП-1.3

Водонепроницаемость бетона определяли по ГОСТ 12730.5 [87] двумя методами: ускоренным – по воздухопроницаемости бетона, и базовым – по глубине проникания воды под давлением. Непосредственно в конструкциях водонепроницаемость определяли прибором ВИП-1.3 (рис. 2.10-в; рис. 2.10-г), который предназначен для ускоренного определения водонепроницаемости бетона в конструкции по величине сопротивления проникновению воздуха. Для повышения точности измерений прибор ВИП-1.3 имеет две вакуумные камеры: одна измерительная, вторая – создает охранную зону.

В лабораторных условиях водонепроницаемость бетона определяли по глубине проникания воды под давлением на образцах-цилиндрах диаметром 95 мм и высотой 50 мм.

#### **2.4. Методы лабораторных испытаний**

Экспериментальные исследования свойств бетона проводили в строительной лаборатории Испытательного центра (ИЦ) ООО «Трансстрой-Тест», в лаборатории ДальНИИС, в лаборатории рентгеновских методов Института химии ДВ РАН. Приборы и оборудование имели поверку и аттестацию в соответствии с требованиями ГОСТ [88].

##### ***Методы определения физико-механических свойств бетона:***

– механические свойства бетона оценивали по прочности на сжатие по ГОСТ 10180 [89] при использовании стандартных образцов-кубов. Испытание образцов на прочность, отобранных из конструкций, проводили по ГОСТ 28570 [86];

– водопоглощение бетона определяли по ГОСТ 12730.3 [90]. Показатель водопоглощения бетона характеризует его открытую капиллярную пористость, поэтому используется для расчета степени насыщения бетона;

– дополнительно определяли водопоглощение бетона под вакуумом. Образцы помещают в вакуумный шкаф (рис. 2.11) и создают разрежение  $(0,08 \pm 0,01)$  МПа, которое автоматически поддерживается на последующих этапах испытаний. Заливают образцы водой на половину высоты при разрежении воздуха в шкафу и выдерживают 2 часа при вакууме. Доливают при вакууме вторую порцию воды на 2 см выше верхней грани образца, выдерживают еще 2 часа. Повышают давление в вакуумном шкафу до атмосферного и насыщенные образцы вынимают из воды, обтирают влажной тканью и взвешивают. Массу воды, вытекшей из образца на чашу весов, включают в массу образца, насыщенного водой. После взвешивания образцы высушивают до постоянной массы.

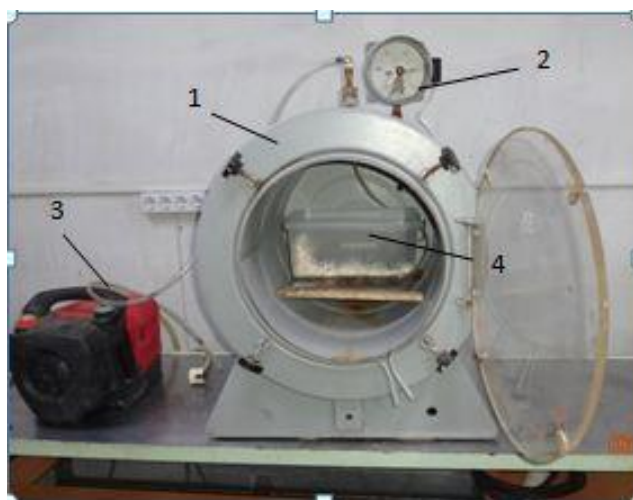


Рис. 2.11. Общий вид установки для определения водопоглощения бетона под вакуумом: 1 – вакуумный шкаф; 2 – датчик контроля и регулирования давления; 3 – вакуумный насос; 4 – емкость для водонасыщения образцов

Водопоглощение образцов по массе ( $W$ ) в процентах вычисляется по формуле:

$$W = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

где:  $m_1$  – масса образца, насыщенного водой, г;  $m$  – масса образца, высушенного до постоянной массы, г.

– морозостойкость бетона определяли по ГОСТ 10060 [30]. Для испытаний использовали оборудование, позволяющее определять морозостойкость по первому базовому методу с замораживанием в воздушной среде при температуре минус  $(18 \pm 2)$  °С и третьему ускоренному методу с замораживанием в 5 %-ном водном растворе хлорида натрия при температуре минус  $(50 \pm 2)$  °С;

– водонепроницаемость бетона определяли в соответствии с ГОСТ 12730.5 [91] по глубине проникания воды под давлением;

– пористость бетона определяли по методикам ГОСТ 12730.4 [92], которые позволяют определить основные параметры пористости, характеризующие морозостойкость бетона: полный объем пор бетона ( $\Pi_{\Pi}$ ); объем открытых некапиллярных пор ( $\Pi_{МЗ}$ ); объем открытых капиллярных пор ( $\Pi_{О}$ ); объем условно-замкнутых пор ( $\Pi_{З}$ ); показатель среднего размера



открытых капиллярных пор; показатель однородности размеров открытых капиллярных пор ( $a$ );

***Методы определения вещественного состава бетона и химического состава цементного камня:***

– химический состав цементного камня в бетоне определяли стандартным методом по ГОСТ 5382 [93] на пробах бетона из сооружений;

– определение содержания хлора проводилось по двум экспериментальным методикам: определение водорастворимых ионов  $Cl^-$  в фильтрате  $Ж/Т = 4$  после кипячения в течение 60 минут и титрованием реактивом по методике из ГОСТ 5382-2019; определение полного содержания ионов  $Cl^-$  в пробах путем сканирования рентгеновских отражений пучка (отраженные электроны);

– дифференциальный термогравиметрический анализ (ДТГА) на дериватографах ОД-102 и Q1500D, чувствительность ТГ = 100..50 мг, ДТА 1/5, ДТТ 1/5, скорость подъема температуры 9 градусов в минуту до 1000 °С, масса навески  $350 \pm 20$  мг;

– рентгенофазовый полуколичественный анализ с помощью рентгеновского дифрактометра Rigaku MiniFlex II (Rigaku, Япония), с использованием излучения  $Cu-K\alpha$ , генерируемого при напряжении 30 кВ и токе 15 мА, с использованием монохроматора на дифрагированном пучке и непрерывной скоростью сканирования с шагом в  $0,02^\circ$ . Определение фаз проводилось с помощью ПО, которое поставлялось вместе с прибором (PDXL) и базы данных ICDD для расшифровки;

– микрозондовый спектральный химический анализ на микроанализаторе JXA8100 при напряжении 20 кV и рабочем токе  $10^{-8}$  А. Для повышения воспроизводимости анализ ведется сканированием зонда по площади  $350 \times 450$  мкм в течение 24 секунд. Всего проводится 5 анализов со сменой анализируемых площадей. За результат принимается среднее значение. Расчет ведется с помощью ПО поставляемого с прибором.

Для проведения анализа керны диаметром 95 мм нарезались без воды на диски толщиной 5-7 мм; отрезались три диска от поверхности бетона и один диск из глубинного слоя. Путем дробления бетона диска отбирали растворную часть. Производили ручной помол растворной части и отсев из смеси фракции крупнее 2 мм. Остаток смеси менее 2 мм домальвали вручную в фарфоровой ступке и просеивали через сито 04. Порошок с тонкостью помола менее 04 представлял пробу для химического анализа.

***Методы определения свойств бетонной смеси:***

– удобоукладываемость оценивали подвижностью бетонной смеси по осадке конуса (ОК) в соответствии с методикой ГОСТ 10181 [94];

– воздухосодержание определяли специальным прибором – воздухомером (рис. 2.12).



Рис. 2.12. Процесс подготовки (а) и испытание (б) бетонной смеси на воздухосодержание

## ГЛАВА 3. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ НА О. САХАЛИН

### 3.1. Воздействие окружающей среды и условия эксплуатации бетонных конструкций в сооружениях

Назначение качественных показателей бетона должно быть основано на показателях внешних воздействий. Следовательно, на первом этапе необходимо оценить природно-климатические факторы и влияние их на работу бетона в конструкциях.

Климатические условия побережья о. Сахалин отличаются разнообразием и своеобразием. Южная часть западного побережья острова омывается водами Японского моря, остальное побережье – водами Охотского моря [95]. Последнее относится к числу холодных субарктических морей и является самым холодным из дальневосточных морей. Одновременное влияние холодного Охотского и теплого Японского морей особенно проявляется в южной части острова. Крайняя южная часть моря никогда не замерзает, поэтому интенсивное строительство портовых сооружений ведется на юге Сахалина.

Гидрометеорологические условия южной части Сахалина характеризуются следующими показателями: море зимой самое беспокойное – средняя повторяемость волнения равна 35-50 %, высота волн достигает 4-6 м. Приливы имеют сложный характер, но наблюдается два основных типа: суточные и смешанные. Приливная волна входит с юга и юго-востока Тихого океана. В южной части острова величина приливов 0,8-2,5 м. Маловетрие и штили в январе и феврале почти отсутствуют, скорость ветра обычно 10-11 м/с. Расчетная зимняя температура наружного воздуха минус 17-19 °С [96].

Исследование условий эксплуатации бетона проводили для зоны переменного уровня воды в зимний период, поскольку в этой зоне бетон подвержен внешним воздействиям, которые являются определяющими для долговечности бетона. Низкие отрицательные температуры зимой – до -20

°С, незамерзающие акватории портов и большая повторяемость волнения в зимний период отражаются на условиях эксплуатации бетона в зоне переменного уровня воды портовых сооружений. В соответствии с классификацией суровости условий эксплуатации портовых сооружений, гидрометеорологические условия на побережье Сахалина относятся к виду тяжелые [68]. Климатические условия создают соответственно суровые условия эксплуатации для бетона. В соответствии с международной и отечественной классификацией агрессивности сред [11, 14], эти условия относятся к классу агрессивности XF4, который характеризует высокую суровость внешних воздействий – сильное водонасыщение в морской воде при циклическом замораживании и оттаивании бетона.

Визуальная оценка работы бетонных конструкций в зоне переменного уровня воды на основе постоянного (ежедневного) мониторинга состояния сооружений в зимний период позволила установить следующее. Бетон в зоне переменного уровня в течение четырех месяцев подвержен различным условиям замораживания. Начиная с ноября месяца конструкции портовых сооружений подвержены воздействию волн, которые при отрицательных температурах воздуха создают условия для обмерзания конструкций в зоне переменного уровня воды (рис. 3.1). Наблюдения за состоянием портовых сооружений в зимний период показали, что механизм замораживания бетона в конструкциях зависит как от участка зоны переменного уровня, так и от времени года морозного воздействия.

В зоне переменного уровня воды можно выделить характерные участки, которые отличаются по условиям замораживания.

В данной работе термин зона переменного уровня воды соответствует определению СП [14] – зона от наинизшего горизонта воды (льда для замерзающих акваторий) до наивысшего горизонта воды и выше на высоту всплеска воды. На рис. 3.2 в зоне переменного уровня воды выделены три характерных участка, отличающиеся условиями насыщения бетона и механизмом замораживания бетона:

- участок А: зона действия отлива и прилива;
- участок В: вертикальный участок конструкции выше уровня прилива;
- участок С: прикордонная зона причала или горизонтальная часть фасонного массива в зоне брызг.



Рис. 3.1. Общий вид причального сооружения в зимний период (декабрь):  
а) период отлива, акватория с плавающим льдом; б) период прилива

Условия эксплуатации бетона на выделенных участках отличаются как по степени насыщения морской водой, так и по величине температурного воздействия. В соответствии с делением на участки зоны переменного уровня был организован инструментальный контроль температуры бетона в конструкции. Для этой цели в тело бетона на различных участках конструкции устанавливали специальные датчики (рис. 3.3), которые фиксировали информацию о температуре в течение зимнего периода. После зимнего сезона они извлекались из конструкции для обработки информации на компьютере.

На участке действия прилива и отлива (участок А, рис. 3.2), исходя из общепринятых представлений, замораживание бетона должно происходить на воздухе в период отлива, а оттаивание в воде – в период прилива. Однако

исследования показали, что в зимний период при температуре воздуха ниже  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  циклическое замораживание и оттаивание бетона происходит на отметках ниже нулевого уровня.

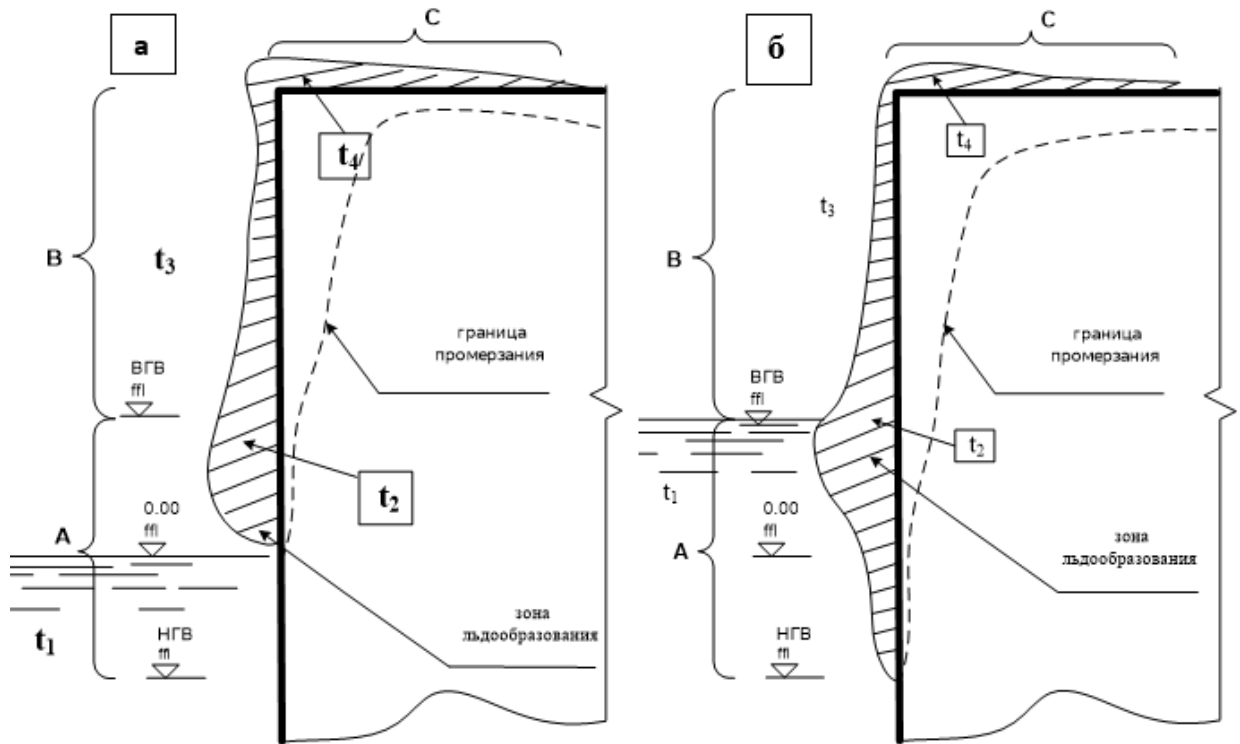


Рис. 3.2. Схема разделения зоны переменного уровня воды на участки (А – участок прямого контакта с морской водой; В и С – участки насыщения бетона от всплеска волны) с учетом водонасыщения и механизма замораживания бетона: а) в начальный и конечный зимний период; б) в основной зимний период



Рис. 3.3. Вид датчика для замера температуры бетона в зоне переменного уровня воды (а), подготовка к установке в конструкцию (тетрапод) датчика температуры (б)

Бетон конструкции выше нулевого уровня не подвержен циклам замораживания-оттаивания (ЗО), поскольку этот участок конструкции покрывается льдом (рис. 3.4-б). На участке ниже нулевого уровня при самых неблагоприятных условиях замораживание бетона происходит при температуре замораживания не ниже  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

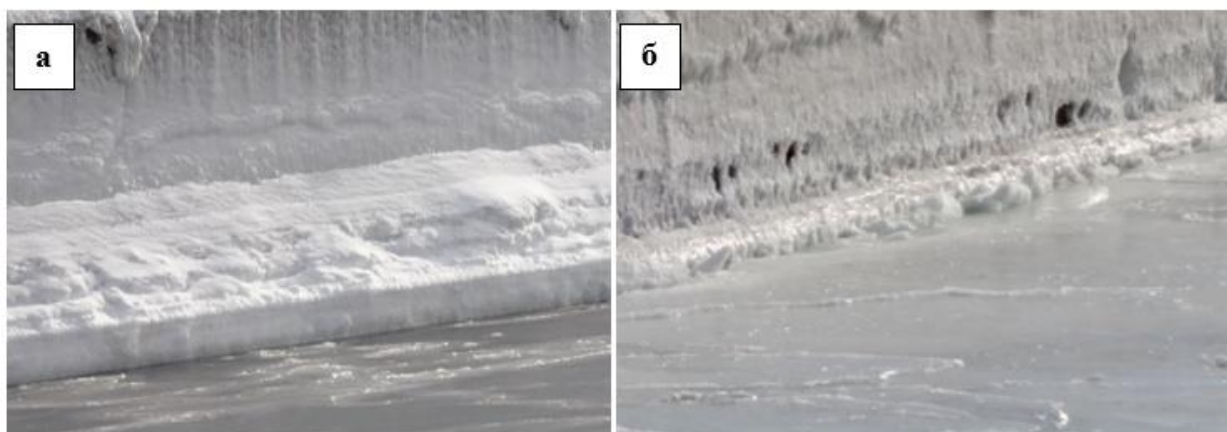


Рис. 3.4. Состояние конструкции в феврале: а) при отливе (04.02.21); б) при приливе (25.02.21)

В качестве примера на рис. 3.5 показан ход температуры бетона при самых минимальных температурах воздуха, которые характерны для района расположения объекта. Как видно, температура замерзания не опускается ниже  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На основании мониторинга установлено, что за период 2020-2022 гг. при этой температуре замораживания происходит лишь 2 цикла ЗО за зимний сезон. В основном циклы ЗО происходят при температуре замораживания не ниже  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Циклическое замораживание и оттаивание бетона на участке А происходит в начальный зимний период до середины декабря, когда вода в акватории не опускается ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 3.6-а) и в конце зимнего периода: это третья декада февраля и первая декада марта (рис. 3.6-б), когда повышается температура воздуха и воды в акватории.

Следует отметить, что температура замораживания бетона при отливе, в силу микроклимата в этой зоне из-за зеркала незамерзающей воды, не будет соответствовать температуре воздуха – она будет выше, чем температура воздуха. Смягчающее влияние оказывает амплитуда и продолжительность

цикла прилива-отлива. График хода прилива-отлива показывает (рис. 3.5, кривая 2), что продолжительность замораживания на участке между отметками НГВ – 0.00 (рис. 3.2-а) может составлять максимально 12 часов, а между отметками ВГВ – 0.00 увеличиваться до 24 часов.

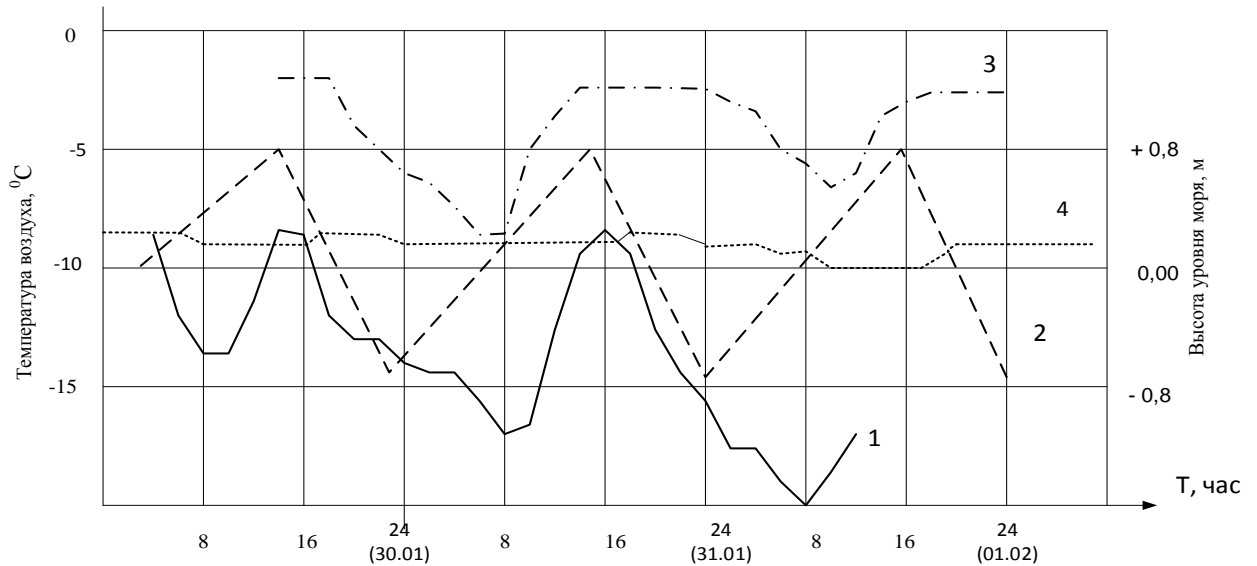


Рис. 3.5. График хода отливов и приливов в акватории порта Корсаков (о. Сахалин); температуры воздуха и бетона в зоне переменного уровня на отметках (+0,6) и (+2,2): 1 – температура воздуха, °C; 2 – ход отлива и прилива, м; 3 – температура бетона на отметке 0,0; 4 – температура бетона на отметке +2,2

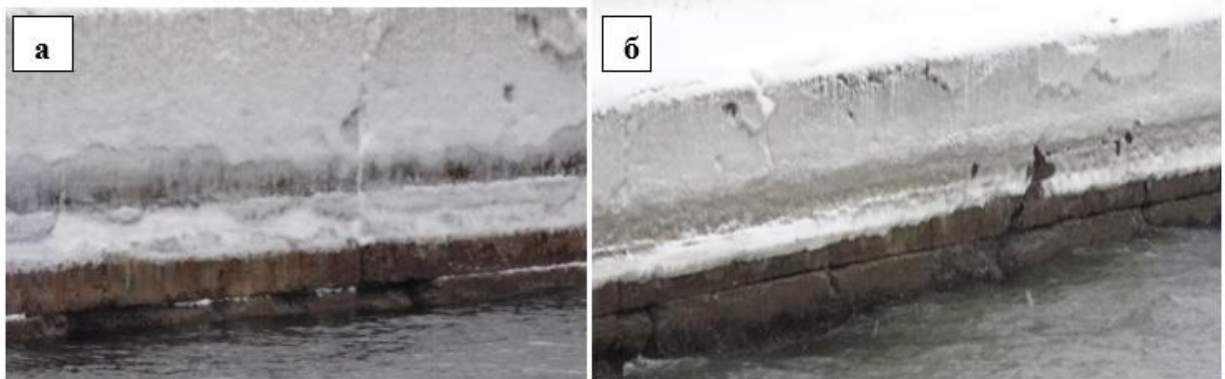


Рис. 3.6. Состояние конструкции при отливе: а) декабрь (23.12.20); б) март (04.03.21)

В зимние месяцы с середины декабря до конца февраля, когда температура воздуха имеет наибольшее отрицательное значение и температура воды опускается ниже нуля, бетон в период прилива не успевает оттаивать. На участке А (рис 3.2-б) из-за периодического колебания уровня



воды в акватории происходит обледенение конструкции (рис. 3.4 и рис 3.7) до конца февраля.



Рис. 3.7. Условия эксплуатации сооружения К1 (таблица 2.1) в зимний период: а) конструкции пирса, защищенные от волн; б) конструкции, не защищенные от волн. Неустойчивое льдообразование в акватории порта в результате нагона льда

Следовательно, зимой в зоне прилива-отлива наблюдаются два периода:

а) бетон подвержен циклическому замораживанию и оттаиванию при температуре замораживания не ниже  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

б) бетон подвержен длительному замораживанию с обледенением при температуре не ниже  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Следует отметить, что циклическое замораживание и оттаивание бетона возможно в поверхностном слое на небольшую глубину при отрицательных температурах менее  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Во время оттепелей слой льда может сходить на участке В, однако при последующем шторме вновь происходит обледенение вертикальной поверхности. В защищенной от волнового воздействия акватории

конструкции на участке В не покрываются льдом (рис. 3.7-а). Различие в условиях замораживания проявляются в том, что в зоне прилива время замораживания бетона определяется типом прилива, и оно значительно меньше, чем для участка всплеска волны, где идет обледенение.

В оградительных сооружениях в зоне переменного уровня часть конструкций может подвергаться длительному обледенению (рис. 3.8).



Рис. 3.8. Вид оградительных сооружений К2 в зимний период: а – общий вид оградительного сооружения; б – условия эксплуатации конструкций в зоне переменного уровня

На участке прилива условия морозного воздействия зависят от времени зимнего периода. Характерное состояние конструкции в начальный и конечный период зимы показано на рис. 3.8-б. Основная часть конструкций в зоне переменного уровня находится на участке действия всплеска волны. Для обеспечения долговечности бетона в агрессивной среде класса XF4 нормативные документы [62, 67] рекомендуют накладывать ограничения к составу бетона и его морозостойкости. Требования по морозостойкости

рекомендуется назначать в зависимости от климатических условий района строительства, которые оцениваются температурой наиболее холодной пятидневки при обеспеченности 0,92.

Установлено, что в зимний период явно видны различные условия по замораживанию и насыщению бетона на двух участках в зоне переменного уровня (рис. 3.2). По общепринятым представлениям на участке действия прилива (участок А) бетон находится в наиболее тяжелых условиях эксплуатации. Это основано на том, что бетон должен подвергаться многочисленным циклам ЗО в зимний период в силу таких природных явлений в дальневосточных морях, как отливы и приливы. При этом бетон в период прилива насыщается водой. Выполненные исследования показали, что в действительности эта зона является наиболее благоприятной по условиям эксплуатации бетона (таблица 3.1).

Таблица 3.1

## Температурные воздействия на бетон в зоне прилива

Участок в зоне прилива	Зимний период	Значение температуры, °С			Механизм замораживания
		воздуха	воды	бетона	
ВГВ – 0.00	(15.11-15.12) (20.02-10.03)	от (-5) до (-10)	от (+2.0) до (0.0)	до (-5)	Циклы ЗО
	(15.12-20.02)	ниже (-10)	от (-5) до (-2.0)	от (-5) до (-10)	Длительное замораживание
0.00 – НГВ	(15.11-15.12) (20.02-10.03)	от (-5) до (-10)	от (+2.0) до (0.0)	(0.0)	Замораживания не происходит
	(15.12-20.02)	ниже (-10)	от (-0.5) до (-2.0)	до (-9)	Циклы ЗО

На участке прилива (участок А, рис 3.2) в начале и в конце зимнего периода, когда температура воздуха не опускается ниже -10 °С, а вода в акватории порта имеет температуру выше нуля, бетон между отметками ВГВ и НГВ не подвергается циклам ЗО. При отливе этот участок не обмерзает, что свидетельствует о недостатке времени для промерзания бетона.

При температуре воздуха ниже  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и температуре воды в заливе  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже на участке А (рис. 3.4) образуется слой льда и бетон не подвержен циклам ЗО. Продолжительность обледенения конструкций может составлять до 60 суток. Слой льда на этом участке формируется от действия приливов и отливов. Постепенное понижение уровня воды при отливе и отрицательная температура воздуха и воды приводят к постепенному наращиванию слоя льда на этом участке. Слой льда на отметке 0.00 может достигать одного метра (рис. 3.4). Общепринятое представление о том, что на участке А суровость внешних воздействий определяется количеством циклов ЗО, которые обусловлены приливами-отливами и температурой замораживания, не соответствует реальным условиям. Поэтому циклы ЗО при высокой степени водонасыщения бетона практически отсутствуют или проходят при невысоких отрицательных температурах замораживания.

На участках В и С (зона всплеска волн) бетон подвергается длительному замораживанию при обледенении в течение 80-90 суток (рис. 3.2). Замораживание бетона происходит при отрицательных температурах на  $2-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  ниже, чем в зоне действия прилива.

Результаты проведенных исследований показывают, что для бетона зоны переменного уровня показателями суровости внешних воздействий в зимний период являются:

- число циклов замораживания и оттаивания ( $N_{FT}$ );
- температура оттаивания ( $t_T$ );
- температура замораживания ( $t_F$ );
- продолжительность замораживания ( $T_F$ );
- продолжительность оттаивания ( $T_T$ ).

Исходя из преобладающих факторов внешних воздействий, можно выделить два вида механизма замораживания бетона по преобладающим показателям воздействия: степени насыщения бетона и характеру воздействия отрицательной температуры:

$$-P_{F1} = f(t_F; t_T; N_{FT}) \text{ для участка А,} \quad (3.1)$$

$$-P_{F2} = f(t_F; T_F) \text{ для участков В и С.} \quad (3.2)$$

На основании этого рассмотрена значимость факторов  $t_F$ ;  $t_T$ ;  $N_{FT}$ ;  $T_F$  в этих механизмах замораживания для долговечности бетона, исходя из современных теоретических положений механизмов морозного разрушения бетона.

### 3.2. Виды и характер разрушения бетона в зоне переменного уровня

#### ВОДЫ

Одной из задач данной диссертационной работы является установление фактов разрушения бетона, характера и возможных причин этих разрушений для понимания долговечности конструкций и долговечности бетона. Эта информация необходима как для разработки методов совершенствования технологии бетонных работ, так и понимания механизма деградации для разработки моделей прогноза долговечности бетона в условиях морозного воздействия.

Результаты проведенных исследований систематизированы в таблице 3.2. В настоящее время при исследовании морозного воздействия на бетон выделяют два вида повреждений – объемное ( $P_V$ ) и поверхностное ( $P_{II}$ ) [9, 56]. Объемное (или внутреннее) разрушение характеризует разрушение структуры всего объема элемента конструкции (рис. 3.9-а). Для поверхностного разрушения характерно нарушение структуры только поверхностного слоя образца или растворной части в поверхностном слое бетона в конструкции (рис. 3.9-б). Такое разрушение, полагают [9], характерно для бетонов, в структуре которых создана система условно-замкнутых пор.

Таблица 3.2

Вид и характер разрушений бетона в зоне переменного уровня портовых сооружений и возможные причины их возникновения

Вид разрушения	Характер разрушения бетона	Возможные причины разрушения, связанные с технологией бетона
$P_{II}$	Поверхностное разрушение до	Применение загрязненного щебня или щебня, имеющего высокое

	обнажения крупного заполнителя (рис. 3.9-б)	водопоглощение, механическое воздействие волн и льда. Водонасыщение поверхностного слоя бетона до критической степени в процессе эксплуатации, дополненное механическим воздействием волн и льда.
$P_B$	Объемное прогрессирующее разрушение (рис. 3.9-а)	Структурная неоднородность бетона из-за нестабильности технологических режимов: нарушение режимов уплотнения, применение бетонных смесей способных к расслоению при уплотнении.
$P_{C1}$	Отслоение поверхностного слоя из-за разрушения внутреннего подстилающего слоя бетона на участках обледенения (постепенный отказ, рис. 3.10-а)	Неоднородность бетона в конструкциях из-за расслоения бетонной смеси при использовании высокоподвижных смесей. Водонасыщение внутренних слоев бетона до критической степени в процессе эксплуатации при высоких качественных показателях бетона в поверхностном слое.
$P_{C2}$	Глобальное или локальное поверхностное разрушение бетона на участках обледенения конструкций с отслоением поверхностного слоя из-за разрушения внутреннего слоя (внезапный отказ, рис. 3.10-б,в)	Недостаточное время для вызревания структуры бетона при первом длительном цикле замораживания. При первом замораживании бетона на границе замерзания происходит насыщение пор до критической степени за счет миграции влаги из внутренних слоев бетона.
$P_T$	Растрескивание бетона (рис. 3.11-а; рис. 3.12-а) с последующим разрушением на куски (рис. 3.11-б).	Нарушение режима твердения бетона.

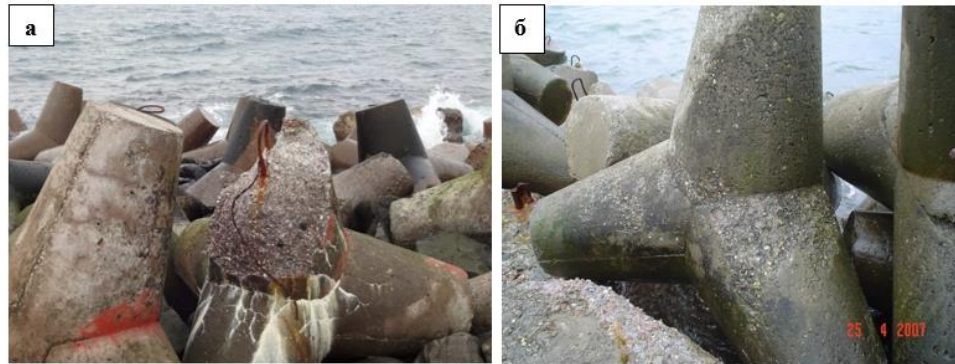


Рис. 3.9. Виды разрушения бетона в тетраподах после 45 лет эксплуатации а) объемное разрушение; б) поверхностное разрушение в виде шелушения

Вид разрушений  $P_C$  наблюдается в конструкциях после первого зимнего сезона (рис. 3.10-б,в) и в конструкциях с длительным сроком эксплуатации (рис. 3.10-а) на участках В и С зоны переменного уровня (рис. 3.2), подверженных волновому воздействию выше зоны прилива, т.е. на участках обледенения, где отсутствует циклы ЗО.



Рис. 3.10. Отслоение поверхностной части бетона с последующим объемным разрушением внутренних слоев бетона: а) конструкция (тетрапод) после 40 лет эксплуатации на объекте Х2-1; б) конструкция (гексабит) после первого зимнего сезона на объекте К3-1; в) конструкция причальной стенки после первого зимнего сезона на объекте К3-2

В результате обследования сооружений отмечен вид разрушения, который связан с нарушением технологических режимов твердения бетона в

конструкциях и проявляется на этапе эксплуатации. Данный вид разрушений обозначен как  $P_T$  и принят в исследованиях в качестве одного из показателей, характеризующих уровень организации технологического процесса изготовления конструкций. При эксплуатации конструкций с повреждениями вида  $P_T$  наблюдается трещинообразование с раскрытием до 5 мм. Конструкции с такими повреждениями в зоне прибоя разрушаются от воздействия волн на отдельные куски. Такой вид разрушений характерен, например, для тетраподов в берегоукрепительных сооружениях (рис. 3.11).



Рис. 3.11. Вид разрушения  $P_T$  у тетраподов на объекте Х2-1: раскрытие трещин в бетоне (а) и последующее разрушение на отдельные части от воздействия прибойной волны (б)

К разрушениям вида  $P_T$  можно отнести трещинообразования в местах установки закладных элементов или разрушения защитного слоя в армированных конструкциях (рис. 3.12).

Деление зоны переменного уровня на участки по условиям внешних воздействий (рис. 3.2) и классификация разрушений по видам (таблица 3.2) позволили в результате визуального обследования сооружений определить участки конструкций с преобладающими видами разрушений в сооружениях (таблица 3.3).

Общепринято считать, что бетон на участке А (рис. 3.2) зоны переменного уровня подвергается наиболее суровому внешнему воздействию в зимний период, поскольку в зоне действия отлива и прилива водонасыщенный бетон в зимний период подвергается наиболее суровому



виду воздействия – циклическому ЗО. При этом, наряду с морозным воздействием, бетон подвержен воздействию льда и волн.

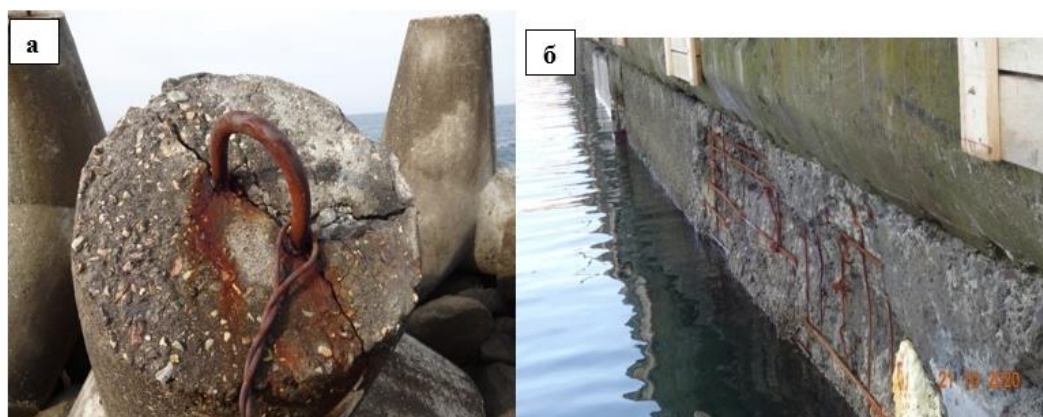


Рис. 3.12. Вид разрушения  $P_T$ : трещинообразование в бетоне в местах установки монтажных петель (а) и разрушение элементов вследствие несоблюдения толщины защитного слоя для арматуры (б)

Таблица 3.3

Вид и характер разрушений бетона в зоне переменного уровня портовых сооружений на о. Сахалин

Шифр сооружения	Вид и характер разрушений бетона на различных участках зоны переменного уровня воды		
	Участок А	Участок В	Участок С
К1	$P_{II}$ (Л) $P_B$ (Л)	Механические повреждения	Механические повреждения
Х2-1	$P_{II}$ (Л)	$P_B$ (Л) $P_{II}$ (Л) $P_{C2}$ (Л) $P_T$ (Л)	$P_B$ (Л) $P_{II}$ (Л) $P_{C2}$ (Л) $P_T$ (Л)
Х2-2	Разрушения отсутствуют	Разрушения отсутствуют	Разрушения отсутствуют
К2	$P_{C2}$ (Л)	$P_B$ (Л) $P_{II}$ (Л) $P_{C2}$ (Л)	$P_B$ (Л) $P_{II}$ (Л) $P_{C2}$ (Л)
К3-1	Разрушения отсутствуют	$P_{C1}$ (Л)	$P_{C1}$ (Л)
К3-2	Разрушения отсутствуют	Разрушения отсутствуют	Разрушения отсутствуют
У3	Разрушения отсутствуют	$P_{C1}$ (Г)	$P_{C1}$ (Г)
Н3	-	Разрушения отсутствуют	$P_B$ (Л)
К3-2	-	$P_{C1}$ (Г)	$P_{C1}$ (Г)
К3-3	Разрушения	Разрушения	Разрушения

	отсутствуют	отсутствуют	отсутствуют
X3-3	Разрушения отсутствуют	$R_{II}$ (Л)	$R_{II}$ (Л)

Примечания: характер разрушения: Л – локальный, Г – глобальный.

Мониторинг внешних воздействий в зимний период на бетон конструкций различных видов портовых сооружений позволил установить особенность механизмов замораживания бетона в зоне переменного уровня воды. Бетон на участке А наряду с циклическим ЗО подвержен длительному обледенению. При этом параметры циклов ЗО не отличаются высокой суровостью, поскольку температура замораживания не опускается ниже  $-9^{\circ}\text{C}$ . Длительное обледенение конструкций протекает при более низких значениях температуры. В сооружениях, конструкции которых выполнены из классического бетона, происходит разрушение в основном двух видов –  $R_B$ ,  $R_{II}$ , а в конструкциях, изготовленных из бетона с воздухововлекающими добавками ПАВ, наблюдаются виды разрушений –  $R_B$ ,  $R_{II}$ ,  $R_{C1}$ ,  $R_{C2}$ ,  $R_T$ . Отмечено, что в обследованных сооружениях разрушения в основном носят локальный характер, который может проявляться в виде разрушений бетона на отдельных участках конструкции или отдельных конструкций в оградительных сооружениях. Причина этих разрушений, безусловно, связана с недостаточной морозостойкостью бетона. В этом случае процесс деградации усиливается воздействием льда и волн. Необходимо отметить, что процесс деградации бетона может усиливать морская вода, которая относится к агрессивной среде.

Бетон на участках В и С (рис. 3.2) зоны переменного уровня в зимний период подвергается только обледенению и не испытывает большого количества циклов ЗО. На участках В и С зоны переменного уровня прослеживаются все четыре вида выделенных разрушений –  $R_B$ ,  $R_{II}$ ,  $R_T$ ,  $R_C$  (таблица 3.2), в конструкциях которые изготовлены по современным технологиям, т.е. с применением в бетоне структурообразующих добавок

ПАВ и режимов тепловой обработки. Например, это отмечено в ограждающем сооружении Х2-1 из фасонных массивов (рис. 3.11).

Особо следует отметить разрушение вида  $P_C$  (рис. 3.10) – отслоение поверхностного слоя с разрыхлением подстилающего. Этот процесс происходит стремительно, в течение одного зимнего периода, поэтому данный вид разрушения определен как внезапный отказ [97]. В работе [14] показаны признаки того, что ускоренный процесс водонасыщения пор в подстилающем слое до критической степени обусловлен недостаточной зрелостью структуры бетона.

По внешним признакам видно, что поверхностный слой имеет плотную структуру по сравнению с рыхлым внутренним слоем бетона. Процесс разрушения бетона в конструкциях может иметь различную кинетику. В сооружении Х2-1 (рис. 3.10-а) процесс разрушения бетона в конструкциях проходил в течение 40 лет, а в сооружениях К3-1 и К3-2 (рис. 3.10-в,г) – в течение одного зимнего сезона.

Анализ технологии бетонных работ, принятой для изготовления конструкций для объекта Х2-1, дает основания полагать, что одной из причин разрушения бетона вида  $P_C$  (рис. 3.10-а) является применение высокоподвижной бетонной смеси. В этом случае возрастает вероятность расслоения бетонной смеси при уплотнении. В результате поверхностный слой бетона может иметь плотную структуру, которая обеспечивает стойкость к морозному воздействию, а внутри получается бетон с пониженными свойствами к морозному воздействию. Несмотря на то, что поверхностный слой бетона, казалось бы, подвержен более суровому режиму морозного воздействия он не разрушается. Очевидно, высокая плотность бетона в этом слое не позволяет насытить поры до критической степени. Поэтому после 45 лет эксплуатации в конструкциях могут отсутствовать поверхностные разрушения бетона, однако в подстилающем слое из-за различий в структуре может происходить насыщение пор до критической степени, что является причиной разрушения конструкции. Как видно, этот

процесс может протекать в течение длительного времени и на финальном этапе иметь прогрессирующий характер. Однако не исключается и факт проницаемости воды во внутренние слои конструкции за счет трещин в плотном поверхностном слое бетона.

Результаты обследований показывают, что разрушения вида  $R_C$  может иметь глобальный характер, т.е. разрушения бетона происходят на большом участке сооружения. Установлено, что в основном преобладают локальные разрушения. Глобальные разрушения (рис. 3.10-в,г) характерны после первого зимнего периода на участках конструкций, подверженных длительному обледенению.

Следует отметить, что при обследовании сооружений не выявлены разрушения бетона, которые обусловлены коррозией арматуры. Например, причина разрушения бетона с оголением арматуры в сооружении К1 (рис. 3.12) в большей степени, очевидно, связана с низкой морозостойкостью бетона, чем с коррозией арматуры. Однако не исключено, что в этом случае определенное влияние на деградацию бетона могла оказать коррозия арматуры. Защитный слой бетона на этом участке конструкции имел толщину 10-20 мм, что явно недостаточно для конструкций в зоне переменного уровня.

При обследовании сооружения Х1 отмечены железобетонные конструкции, расположенные в зоне действия брызг от морских волн, с разрушениями, характерными для недолговечного бетона при эксплуатации в морской воде в условиях замораживания-оттаивания. Эти разрушения связаны как с недостаточной морозостойкостью бетона (рис. 3.13), так и с недостаточной толщиной защитного слоя бетона (рис. 3.14).



Рис. 3.13. Состояние железобетонных конструкций волноотбойной стенки в зоне обрызгивания морской волной на объекте X1 после 20-летнего срока эксплуатации



Рис. 3.14. Состояние железобетонных конструкций после 5-летнего нахождения в зоне обрызгивания морской волной на объекте X1

### **3.3. Технологии бетонных работ при изготовлении конструкций для морских портовых сооружений на Сахалине**

За анализируемый период портового строительства на Сахалине, т.е. за период с 1920 года по настоящее время, хорошо прослеживаются применение двух технологий бетона – традиционной и современной. Период с 1920 по 1945 год, характеризуется применением для изготовления бетонных конструкций портовых сооружений традиционной технологии, основанной на использовании обычного (классического) бетона. Период с 1970 года по настоящее время характеризуется применением новой

(современной) технологии бетона, основанной на использовании добавок ПАВ для улучшения технологических свойств бетонной смеси и повышения качественных показателей бетона.

Результаты исследований, представленные в данном разделе и в разделах 3.1 и 3.2, с одной стороны, свидетельствуют о возможности получения бетонов с высокими показателями стойкости для портовых сооружений, эксплуатируемых в специфических зимних условиях южного побережья о. Сахалин. Реально этот срок может составлять не менее 100 лет. С другой стороны, наблюдаемые разрушения бетона в сооружениях, построенных в последнее время, дают основания считать, что существуют проблемы в надежности технологий бетона. Поэтому важно установить критические параметры технологии, определяющие ее надежность и на основании этого совершенствовать технологию для минимизации отказов бетона в расчетный срок службы конструкций.

Методика натурных исследований предусматривала определение основных свойств бетона в конструкциях трех портовых сооружениях: К1, К2 и К3. Отличительная особенность этих сооружений состояла в том, что они имеют разные по длительности сроки эксплуатации и различные технологии бетона для их изготовления. Основная цель этих исследований заключалась в определении влияния свойств бетона, оцениваемых стандартными методами, на его долговечность в конкретных условиях эксплуатации.

### **3.3.1. Опыт применения обычной (традиционной) технологии бетона**

Опыт применения обычной технологии в морском портовом строительстве рассмотрен на примере сооружения К1, строительство которого велось в течение 20-30 гг. прошлого века. Подводная часть сооружения возведена из массивов-гигантов, которые изготавливали в полигонных условиях на берегу. До настоящего времени сохранился массив-гигант, который подготовлен к установке на объект К1 (рис. 2.1). Визуальное

обследование массива-гиганта показало, что при его изготовлении предъявлялись различные требования к технологии бетона. Например, для нижней части конструкций для бетона использовали гравий или ПГС. Верхняя часть конструкции, т.е. часть зоны действия прилива, изготовлена с применением для бетона качественного щебня. Есть все основания полагать, что производство бетонных работ «насухо» и твердение в естественных условиях позволило сформировать структурные характеристики в обычном бетоне, позволяющие обеспечить срок службы более 90 лет в зоне переменного уровня. Причины этого связаны как с технологией бетонных работ, так и с условиями морозного воздействия. Изготовление массивов-гигантов осуществлялось на берегу для возможности их спуска по слипу на воду. Весь технологический процесс бетонных работ был организован непосредственно у места изготовления конструкции. Габариты изделия и необходимость его транспортирования к месту установки предопределяли технологические режимы бетонных работ, в частности, для спуска и транспортирования конструкции по воде требовался длительный период выдерживания бетона в опалубке для набора прочности. Массивы-гиганты в сооружении расположены таким образом, что верхний уровень конструкции находится на 20-30 см выше максимального прилива, что позволяло возводить монолитную надстройку «насухо». Технология изготовления сооружения позволила исключить сложные бетонные работы в подводной зоне и в зоне действия прилива, т.е. были обеспечены нормальные условия для изготовления конструкций в зоне переменного уровня воды.

Сведения о составах бетонов, применяемых для изготовления портовых сооружений, отсутствуют, однако исходя из основополагающих принципов, заложенных в формирование традиционной технологии в начале XX века, можно предполагать, что бетон имел средние по уровню качества показатели. Имеются сведения, что материалы для бетона, включая цемент, использовали местные. Очевидно, в технологии бетонных работ основной упор делался на прочностные показатели.

В сооружении К1 пробы бетона отбирали путем выбуривание кернов диаметром 95 мм на трех участках причала № 7 в зоне переменного уровня воды. Участок А расположен в зоне действия прилива-отлива. В зону участка А входит надводная часть массива-гиганта (рис. 2.7) и часть монолитного участка надстройки. Участки В и С находятся в монолитной надстройке причальной стенки: В – вертикальный участок, С – горизонтальный участок. Отбор кернов на участке А проводился при максимальном отливе, что позволило отбирать керны на отметке 0,3-0,5 м выше нижнего горизонта воды (рис. 3.15 и рис. 3.16), т.е. из самого напряженного по количеству смен насыщения и высушивания в период положительных температур воздуха и по количеству циклов замораживания и оттаивания в период отрицательных температур воздуха. Отбор кернов выполняли полым сверлом с алмазной напайкой диаметром 100 мм и длиной 400 мм. Это позволяло просверливать стенку массива-гиганта толщиной 300 мм насквозь.

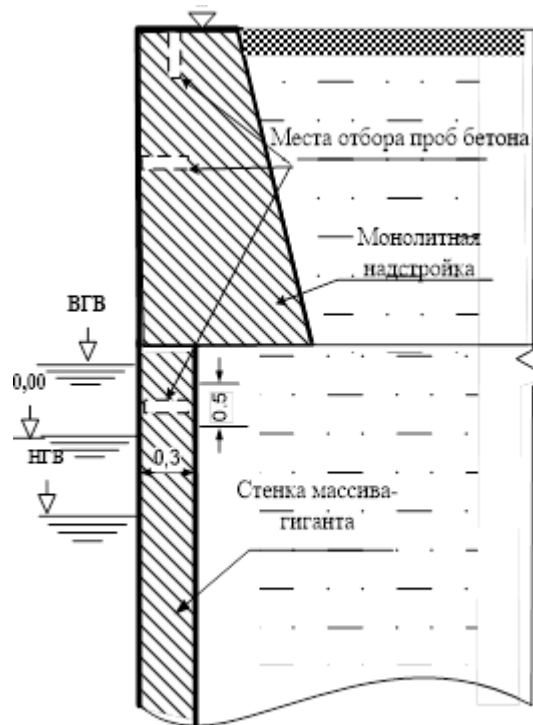


Рис. 3.15. Сооружение К1: схема причальной стенки с местами отбора проб бетона

Показатели качества бетона оценивали стандартными методами [10]. Морозостойкость бетона оценивали вторым базовым методом, который



предусматривает замораживание образцов в воздушной среде при температуре  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  и оттаивание в водном растворе в 5 %-ном водном растворе NaCl при температуре  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Дополнительно на горизонтальном участке С определяли прочность бетона методом отрыва со скалыванием и водонепроницаемость по воздухопроницаемости бетона. По этой методике отбирали керны из трех секций причала сооружения К1.

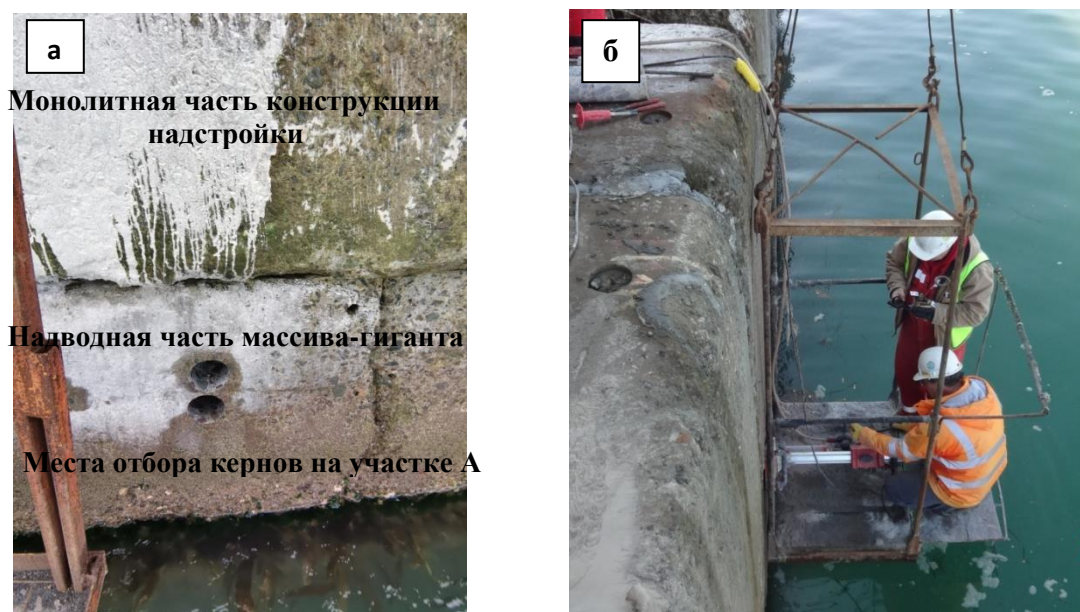


Рис. 3.16. Сооружение К1: а) вид вертикального участка конструкции; б) процесс отбора кернов на участке А при отливке

Химические методы применяли для анализа состава бетона и определения глубины карбонизации и проникновение хлорид-ионов в бетон. Пробы бетона, отобранные из участков А и В, использовали для исследования влияния на фазовый состав цементной матрицы морской воды после 90 лет эксплуатации бетона.

Результаты исследований образцов бетона из конструкций, приведенные в таблице 3.4 дают основание предполагать, что для изготовления конструкций применялась обычная технология, принятая для данного периода строительства морских гидротехнических сооружений. Поэтому к началу эксплуатации сооружения бетон в конструкциях этого сооружения имел средние показатели качества.

Показатели качества бетона в сооружении К1

Индекс сооружения и конструкции	Срок эксплуатации, год	Прочность при сжатии, МПа		Марка F, циклы	Марка W, МПа	
		R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>		W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>
<b>К1</b>						
<b>Секция 1:</b>						
Участок А-1		56,9		20-50	-	-
Участок В-1		52,3		то же	< 0,2	-
Участок С-1		58,9	57,3	то же	-	20
<b>Секция 2:</b>						
Участок А-2		62,1		20-50	-	-
Участок В- 2		59,6		то же	-	-
Участок С-2		58,3	62,7	то же	< 0,2	22
<b>Секция 3:</b>	> 90					
Участок А-3		57,6		20-50	< 0,2	-
Участок В- 3		48,9		то же	-	-
Участок С-3		55,4	55,4	то же	-	18

Примечания: R<sub>1</sub> и R<sub>2</sub> – средняя прочность бетона соответственно по методике с ГОСТ 28570 [86] (испытание образцов-цилиндров) и по методике ГОСТ 22690 [85] (отрыв со скалыванием). W<sub>1</sub>; W<sub>2</sub> – водонепроницаемость бетона соответственно по методикам из п.2.3 и приложения Д в ГОСТ 12730.5 [87]

Из этого можно сделать вывод о низкой морозостойкости бетона, которая характерна для всех участков зоны переменного уровня. Фактическая морозостойкость оказалась на порядок ниже нормируемой в настоящее время. Однако этих показателей оказалось достаточно для обеспечения высокой долговечности. Результаты исследований сооружения К1 показывают, что конструкции из обычного бетона с применением традиционной технологии позволяют обеспечивать высокую долговечность бетона в зоне переменного уровня в условиях морозного воздействия и сильного насыщения морской водой при очень низких показателях морозостойкости.

При обследовании конструкций сооружения отмечено следующее: разрушение бетона происходит в зоне прилива и носит локальный характер; вид разрушения на локальных участках соответствует виду, который

наблюдается при стандартных испытаниях на морозостойкость у бетонов с высоким значением В/Ц.

Локальный характер разрушения может быть обусловлен некачественным уплотнением или расслоением бетонной смеси. Один из недостатков изготовления бетонной смеси в полигонных условиях при обогащении местного песка путем промывки – это сложность контролировать и корректировать воду в бетонной смеси. Это влияет на стабильность параметра отношения В/Ц. Критическими параметрами долговечности для обычных бетонов являются водоцементное отношение (В/Ц), расход цемента (Ц) и режим твердения. В технологии бетона, как правило, содержание цемента в бетонной смеси является жестко контролируемым параметром, а В/Ц может контролироваться визуально по качеству бетонной смеси. Опыт показывает, что профессиональные операторы на БСУ могут определять качество бетонной смеси визуально. Есть все основания считать, что определяющим критическим показателем для бетона в сооружении К1 был режим твердения бетона. Очевидно, длительный срок твердения бетона позволял формировать поровую структуру, в которой водонасыщение для морозного воздействия не было критическим, т.е. не возникало разрушающей нагрузки.

Результаты определения основных показателей качества бетона в сооружениях, приведенные в таблице 3.4, уточнили и расширили общепринятые представления о значимости факторов, определяющих долговечность бетона в зоне переменного уровня.

Например, имеются определенные несоответствия между показателями качества бетона и фактической долговечностью бетона в конструкциях. В частности, невысокие качественные показатели обычного (бездобавочного) бетона по морозостойкости и водонепроницаемости при высоких показателях прочности – до 60 МПа. Это не вписывается в существующие представления о роли механических и физических свойств в долговечности бетона в

условиях морозного воздействия. В результате испытаний бетона из конструкций сооружения К1 установлено следующее:

- 1) Прочность бетона находится в пределах от 46,9 до 62,7 МПа, среднее значение прочности составляет 56,8 МПа;
- 2) Морозостойкость не превышает 50 циклов, полное разрушение образцов происходило после 20-50 циклов;
- 3) Водонепроницаемость не выше W2, сквозная протечка образцов высотой 50 мм происходит при давлении 0,2 МПа.

Результаты исследований показывают возможность применения традиционной технологии бетона для получения конструкций со сроком службы не менее 100 лет, что не коррелирует с современными предписывающими требованиями к технологии морозостойкого бетона. Результаты, приведенные в таблице 3.4, показали, что при низкой морозостойкости – менее марки бетона по морозостойкости F<sub>250</sub>, обеспечена долговечность конструкциям в зоне переменного уровня около 100 лет. При этом прочность бетона в конструкциях превышает 50 МПа, что по современной классификации соответствует высокопрочному бетону.

Принимая во внимание технологический уровень бетонных работ в начале прошлого века, можно предполагать, что для изготовления конструкций применяли обычный бетон с В/Ц не менее 0,5. В этом случае в условиях нормального твердения бетон после 28 суток должен иметь прочность в пределах 15-20 МПа. Следовательно, за 100 лет прочность бетона увеличилась в три раза. Это соответствует прогнозу роста прочности бетона за 100 лет в условиях нормального твердения, рассчитанному по широко известной формуле [87]:

$$R_N = R_{28} \frac{\lg N}{\lg 28} \quad (3.1)$$

где:  $R_N$ ,  $R_{28}$  – прочность бетона на сжатие в возрасте  $N$  и 28 сут;  $\lg N$  и  $\lg 28$  – десятичный логарифм возраста бетона.

Если принять в расчетах, что твердение бетона в конструкции происходит только в период с положительной температурой воздуха, тогда в районе эксплуатации объекта ежегодно этот период в среднем будет составлять 210 суток, т.е. за 100 лет эта продолжительность составит 21000 дней. Прогнозный расчет по формуле показывает, что при прочности бетона  $R_{28} = 15$  и 20 МПа и продолжительности 21000 суток прочность должны быть соответственно 45 МПа и 60 МПа. Это соответствует фактическим данным о прочности. Следовательно, есть все основания полагать, что в течение этого периода бетон находился в благоприятных условиях и процессы деградации в нем не происходили. Прогресс роста прочности соответствует известным прогнозным моделям при твердении бетона в нормальных условиях [91]. Однако прогресс в повышении морозостойкости бетона не наблюдался. В соответствии с положениями структурной теории длительность твердения должна была положительно отразиться на параметрах поровой структуры и, соответственно, на морозостойкости бетона.

Результаты исследования проб бетона из зоны переменного уровня при стандартных испытаниях при температуре замораживания  $-15$  °С показали, что бетон не отличается высокой морозостойкостью. Понижение температуры замораживания до  $-15$  °С привело к полному разрушению бетона в диапазоне 15-50 стандартных циклов ЗО (рис. 3.17). Характерно объемное разрушение бетона. Можно наблюдать, что слабым структурным участком в бетоне является контакт крупного заполнителя с растворной частью. Поэтому есть основание считать, что за 90 лет значительного прогресса в совершенствовании параметров структуры капиллярных пор не произошло.

Общепринятые теоретические положения о механизмах морозного разрушения бетона и результаты исследования механизма замораживания бетона в конструкциях позволяют объяснить причины высокой долговечности конструкций при низкой морозостойкости бетона.



Рис. 3.17. Характер разрушения проб бетона из сооружения К1 после 39 циклов ПЗО при испытании по второму базовому методу ГОСТ 10060

Во-первых, установлено, что многократное циклическое замораживание и оттаивание происходит только на участке А (рис. 3.2) при действии прилива-отлива в начале и в конце зимы, когда температура воздуха не опускается ниже  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а морской воды в акватории порта – ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Во-вторых, в основной зимний период (60-70 суток), когда температура воздуха опускается ниже  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , конструкции покрываются слоем льда, и бетон не подвержен циклам ЗО (рис. 3.4). Следовательно, в зоне действия прилива-отлива суровость циклов значительно ниже по сравнению с суровостью режима стандартных испытаний. Различные механизмы замораживания бетона на характерных участках зоны переменного уровня определяют и различные механизмы разрушения бетона. Возможность упрочнения бетона при отрицательных температурах отмечена в работе [34] при наличии в структуре цементного камня воды в жидкой фазе.

Полученные результаты свидетельствуют, что определяющая роль в процессах разрушения отводится температуре замораживания. В условиях южного побережья Сахалина циклы ЗО не являются определяющим критическим показателем внешних воздействий. Из полученных результатов видно, что требуемая стандартная морозостойкость по нормативным документам может на порядок превышать морозостойкость, позволяющую

обеспечивать долговечность бетона в зоне переменного уровня морских портовых сооружений в дальневосточных морях.

Результаты исследования подтверждают известный факт, что для обеспечения долговечности бетона в конструкциях портовых сооружений при морозных воздействиях важно обеспечить долговечность в первый зимний сезон. На практике часто наблюдается разрушение именно в этот период [10, 14]. Кинетика этого разрушения лавинообразная, а характер глобальный. Однако этому виду разрушения не уделяют должного внимания, поскольку оно не связано с многократными циклами ЗО. Следует отметить, что этот вид разрушений происходит в зоне всплеска волн на участках В и С (рис. 3.10), где происходит обледенение и преобладающими видами морозного воздействия являются температура и продолжительность замораживания. В зоне действия прилива (участок А) такие разрушения не наблюдаются. В этой зоне происходит постепенное разрушение поверхностного слоя бетона в течение десятков лет, т.е. кинетика процесса разрушения соответствует определению термина «деградация».

Экспериментальные данные показывают, что циклы ЗО являются определяющим критическим показателем суровости внешних воздействий в зоне переменного уровня воды для обычного бетона с  $V/C \geq 0,5$  при температурах замораживания ниже  $-15$  °С. При температурах замораживания бетона выше  $-8$  °С на участке действия прилива морской воды, очевидно, создаются условия для дальнейшего формирования морозостойкой структуры бетона, поэтому нагрузка от морозного воздействия не является критической.

Анализ результатов физико-химических исследований проб, отобранных из кернов 1 и 2, которые характеризовали соответственно участок А (зона прилива) и участок В (зона обрызгивания), показал следующее:

1) Явного влияния морских солей ( $Cl^-$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ) на химический состав цементно-песчаной матрицы не отмечено.

2) Согласно термогравиметрическим и рентгенофазовым анализам в пробах кернов из участка А и В причальной стенки фиксируются все гидратные новообразования, характерные для цементов длительного твердения.

3) Исследуемый бетон причальной стенки полностью пропитан морской водой с примерно равномерным распределением (с небольшой тенденцией к снижению) продуктов коррозии по сечению. Резких изменений концентраций не зафиксировано (таблица 3.5). Возможно, что наличие соли Фриделя в порах бетона кольматирует поровое пространство и в какой-то мере защищают арматуру от коррозии под действием углекислого газа и хлоридов морской воды.

Таблица 3.5

Содержание нерастворимого остатка (НО) и содержание ионов  $Cl^-$  в цементном камне в зависимости от глубины отбора пробы

Маркировка керна и пробы	Глубина отбора пробы, мм	Содержание НО, % (ГОСТ 5382-2019)	Содержание ионов $Cl^-$ , % (ГОСТ 5382-2019)
Керн № 1			
1-1	0-10	58,91	1,86
1-2	10-20	63,14	1,62
1-3	20-30	59,63	1,50
1-4	250-260	66,02	1,32
Керн № 2			
2-1	0-10	57,22	1,93
2-2	10-20	58,60	1,88
2-3	20-30	55,07	1,68
2-4	250-260	52,19	1,61

Примечание: Керн № 1 – участок А, зона прилива-отлива (рис. 3.2); Керн № 2 – участок В, зона обрызгивания (рис. 3.2).

4) Действия сульфатов на бетон не установлено, хотя в некоторых РФА-анализах регистрируется гипс и этtringит.

Результаты исследования проникновения хлорид-ионов по методу изменения цвета бетона показали, что хлориды проникают на глубину в пределах 20-45 мм (рис. 3.18). Исследования проводились на образцах, отобранных из конструкции на участке В (рис. 3.2), который находится в зоне обрызгивания и считается наиболее опасным по степени агрессивности



морской воды. Как видно, за период эксплуатации сооружения, который составляет более 90 лет, глубина проникновения хлорид-ионов находится в пределах толщины защитного слоя 60 мм, который рекомендуется назначать для железобетонных конструкций морских сооружений [15].



Рис. 3.18. Внешний вид образцов после испытания на наличие в структуре бетона хлорид-ионов. Неокрашенные участки характеризуют глубину проникновения  $Cl^-$

Результаты оценки содержания хлоридов в бетоне химическими методами показали (таблица 3.5), что распределение содержания ионов  $Cl^-$  по сечению на глубину 40 мм находится в пределах 1,6-1,9 %. Это содержание значительно выше критического содержания 0,4 % для активизации коррозии арматуры [10].

При обследовании сооружения К1 отмечены локальные разрушения бетона с обнажением арматуры. На наш взгляд, разрушение бетона в основном связано с недостаточной морозостойкостью бетона, поскольку происходит прогрессирующее разрушение бетона на всю толщину стенки массива-гиганта – 300 мм.

Результаты исследования состояния арматуры в кернах, выбуренных из стенки массива-гиганта, показали следующее. В стенках массива-гиганта, толщина которых составляет 300 мм, арматура расположена на расстоянии

80-100 мм от поверхности (рис. 3.19). Для получения данных о состоянии арматуры керн разрезали на части для последующего разрушения бетона и обнажения арматуры (рис. 3.20). Внешний вид арматуры свидетельствует о том, что на поверхности арматуры диаметром 10 мм длиной 90 мм признаки коррозии отсутствуют.

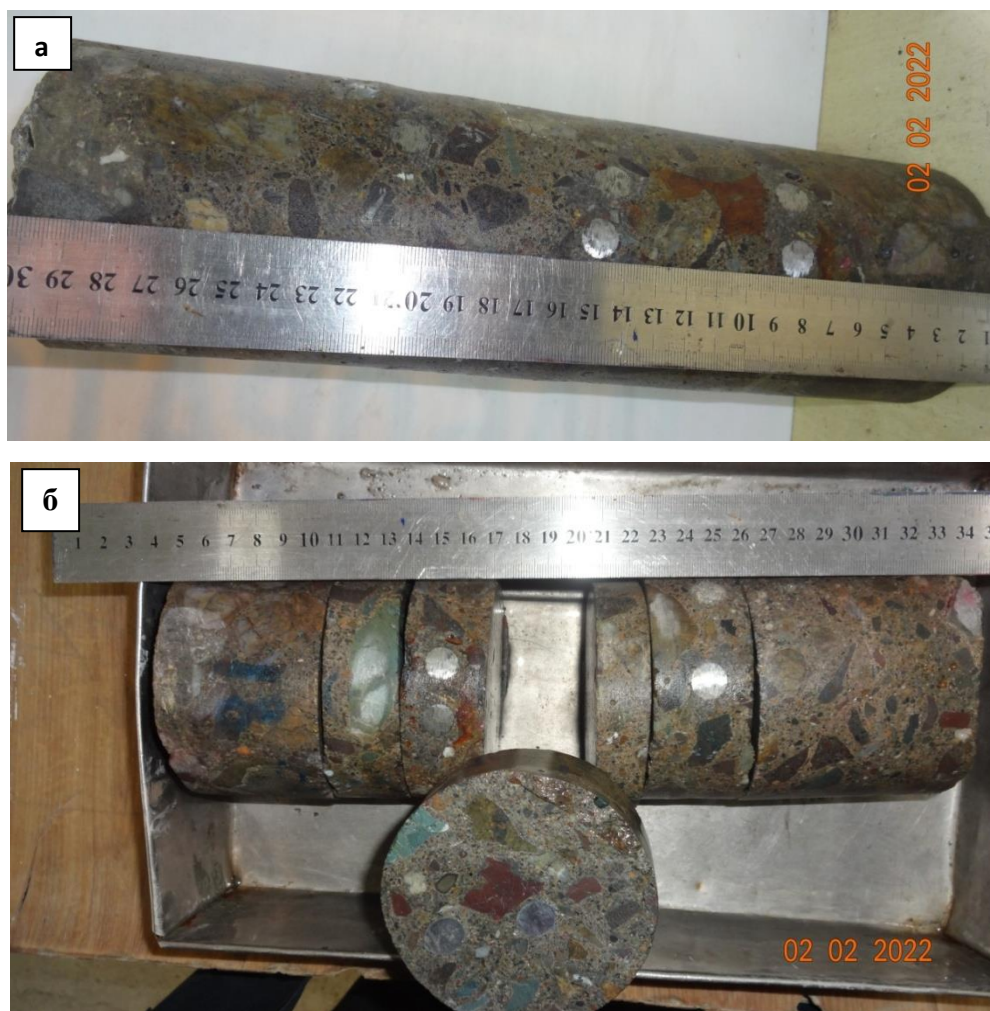


Рис. 3.19. Этапы подготовки образца-керна из зоны переменного уровня для качественной оценки агрессивного воздействия морской воды на арматуру (сооружение К1, строительство 1925-1930 гг.): а) общий вид образца с арматурой; б) распил образца на фрагменты для извлечения арматуры из бетона

Следовательно, защитный слой бетона толщиной 80-100 мм обеспечивает сохранность арматуры в течение 90 лет эксплуатации сооружения. Очевидно, это связано с климатическими условиями, поскольку коррозия арматуры более интенсивно развивается в районах с мягким климатом, например, в условиях южных морей.

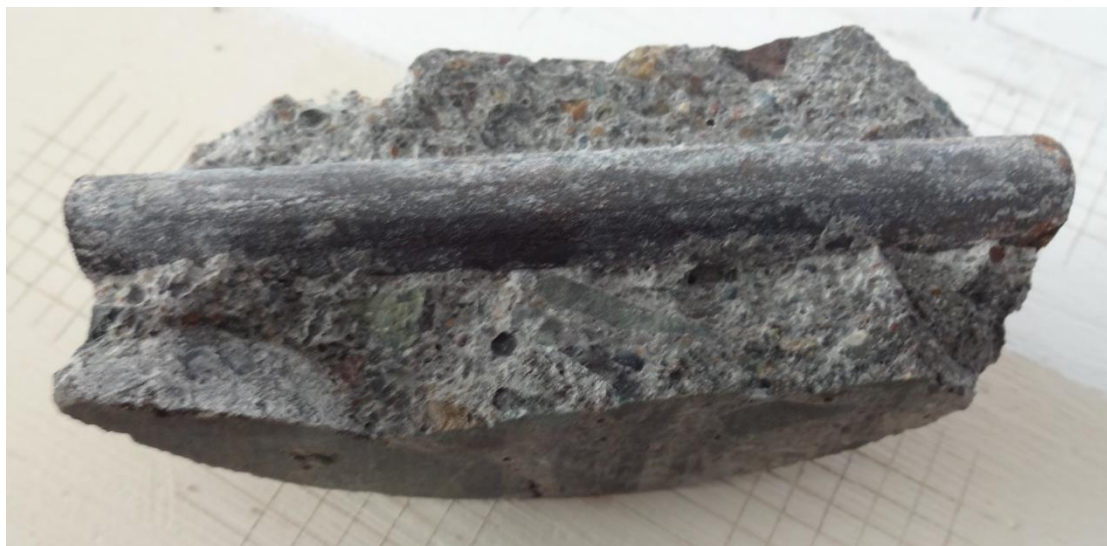


Рис. 3.20. Состояние арматуры в бетоне из зоны переменного уровня (сооружение К1, строительство 1925-1930 гг.)

### **3.3.2. Опыт применения современной технологии морозостойких бетонов**

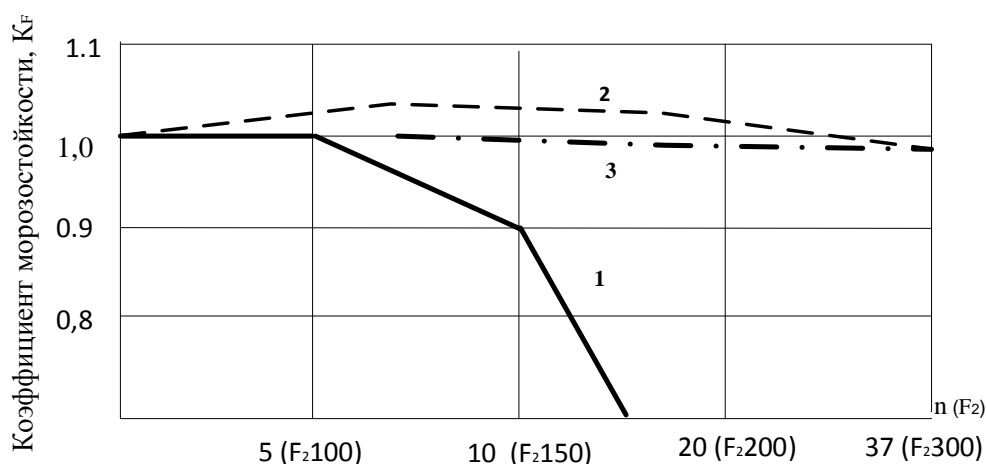
В результате исследований по разработке технологии морозостойкого бетона, проводимых во второй половине XX века [8, 29, 35, 36, 98], были разработаны нормативные документы, в которых излагались рекомендации по комплексным мероприятиям для организации технологии бетонных работ в транспортном строительстве [37, 63, 99]. Эти документы в настоящее время широко используются в практике строительства морских сооружений. Комплекс мероприятий охватывал многие вопросы, которые важно было реализовать на стадии изготовления конструкций. Технологические мероприятия предусматривали не только получение бетонов высокой морозостойкости, но и надежность обеспечения морозостойкости бетона в конструкциях.

Введение в бетонную смесь воздухововлекающих и газообразующих добавок существенно изменяет структуру порового пространства бетона. Возникает новая структура пор, которая относится к виду условно-замкнутых пор. При замораживании бетона они создают возможность аккумулировать воду, вытесняемую из капиллярных пор, при критической степени насыщения [9]. В результате в системе капиллярных пор снижается

вероятность появления критических напряжений, которые являются причиной образования микротрещин. Это положительно влияет на морозостойкость бетона, поскольку создаются благоприятные условия для дальнейшего формирования параметров структуры в дискретной системе капиллярных пор.

Принимая во внимание этот факт и то, что в данной работе исследованы как обычные бетоны, так и бетоны с воздухововлекающими добавками, ниже рассматривается роль воздухововлечения на морозостойкость бетона. Исследования морозостойкости бетонов различных составов, которые предусмотрены программой работы, подтвердили факт, что морозостойкость бетона чувствительна к содержанию искусственно вовлеченного воздуха.

В качестве примера на рис. 3.21, представлены результаты экспериментальных исследований [100], которые показывают возможность существенно увеличить морозостойкость бетона за счет дополнительного воздухововлечения (ВВ).



$n$  ( $F_2$ ):  $n$ - число циклов замораживания-оттаивания;  $F_2$ - марка по морозостойкости

Рис. 3.21. Морозостойкость бетона в зависимости от состава (испытания по третьему ускоренному методу ГОСТ 10060). Цифрами обозначены составы бетона по таблице 3.6

В данной работе выполнены исследования морозостойкости бетонов, составы которых рекомендованы СП и ГОСТ [62, 67]. Для изготовления

бетонов использовали материалы, традиционно применяемые при строительстве морских и транспортных сооружений на Сахалине:

- цемент: ПЦ-500 Д0-Н;
- щебень: прочность 100-120 МПа;
- песок: кварцевый, модуль крупности 2,3.

Таблица 3.6

## Составы и показатели качества бетона

№ состава	В/Ц	Ц, кг <sup>3</sup>	Вид добавки (содержание в % от массы цемента)	Показатели бетонной смеси		Прочность на 28 сутки R <sub>0</sub> , МПа
				ОК, см	V <sub>В.В.</sub> , %	
1	0,46	350	Без добавки	2	2,4	52,7
2	0,42	420	Glenium SKY 591 (0,7) Rheo MAT-RIX 100 (0,15)	18	3,2	61,0
3	0,40	420	ПФМ-НЛК (0,6)	19	5,2	60,4

Режим испытаний на морозостойкость соответствовал третьему ускоренному методу по ГОСТ 10060 [30], который предусматривает замораживание образцов при температуре -50 °С в 5 %-ном водном растворе NaCl. Морозостойкость оценивали по коэффициенту морозостойкости K<sub>F</sub>:

$$K_F = R_F/R_0 \quad (3.2)$$

где: R<sub>0</sub> – предел прочности при сжатии перед началом испытания, МПа; R<sub>F</sub> – предел прочности при сжатии после испытания, МПа.

В эксперименте характеристики бетонов с добавками (таблица 3.6) не имели полного соответствия с требованиями [62, 67], поэтому сравнительный анализ результатов по морозостойкости, представленных на рис. 3.21, следует рассматривать с определенной корректировкой. В этих экспериментах морозостойкость бетона оценивали по методике ускоренных испытаний, поэтому на графиках (рис. 3.21) показано количество циклов испытаний, которые приведены к маркам бетона по морозостойкости F<sub>2</sub> согласно ГОСТ 10060 [30].

Состав бетона без ВВ добавок (состав № 1), который соответствует минимальным требованиям СП 28.13330.2017 [67] по В/Ц и расходу цемента, можно рассматривать в качестве контрольного. Бетон этого состава имеет более низкую морозостойкость и не обеспечивает марку по морозостойкости F<sub>2</sub>200. Бетоны с ВВ добавками: составы № 2 и № 3, имеют морозостойкость выше марки F<sub>2</sub>300. Бетоны всех составов имеют прочность, соответствующую агрессивности среды класса XF4, т.к. превышают минимальный класс В35.

Сравнительные исследования морозостойкости бетонов различных составов показывают, что ограничения, установленные СП и ГОСТ [62, 67], для долговечности в агрессивных средах класса XF4 позволяют обеспечить требуемую марку по морозостойкости не менее F<sub>2</sub>300, которая рекомендована для климатических условий с расчетной температурой воздуха ниже -20 °С.

В производственных условиях, как правило, оценивается не фактическая, а нормируемая морозостойкость, поэтому в настоящее время из-за отсутствия информации о фактической морозостойкости бетона нельзя оптимизировать составы с учетом условий эксплуатации.

Следует иметь в виду, что в бетоне всегда имеется случайно заземленный воздух независимо от наличия воздухововлекающих добавок. Случайно вовлеченный воздух относится к неконтролируемым параметрам и, как правило, вызывает снижение однородности бетона по морозостойкости.

Для определения влияния воздухововлечения на морозостойкость проводились сравнительные испытания бетонов с различным содержанием воздуха в бетонной смеси. Содержание воздуха регулировалось как за счет вида структурообразующих добавок, так и их дозирования. Все составы имеют одинаковое содержание цемента – 500 кг/м<sup>3</sup>.

Морозостойкость определяли по второму базовому методу ГОСТ 10060 [30] с оценкой коэффициентом морозостойкости K<sub>F</sub> (формула (3.2)), как и в исследованиях, представленных выше. Составы бетонов приведены в таблице 3.7, результаты показаны на рис. 3.22.

Составы и показатели качества бетона

№ состава бетона	В/Ц	Вид добавки и содержание (% от массы цемента)	Показатели бетонной смеси		Показатели бетона		
			ОК	V <sub>В.В</sub>	R <sub>0</sub>	F <sub>2</sub>	W
1	0,35	ПФМ = 0,50	8	1,7	64,1	200	> 8
2	0,38	ПФМ+СНВ=0,45+0,01	3	2,4	44,7	400	> 8
3	0,38	ПФМ+СНВ=0,45+0,02	14	3,6	40,9	> 400	> 8
4	0,35	ПФМ+СНВ=0,60+0,02	11	3,7	48,9	> 600	> 8

Примечания: ОК – подвижность бетонной смеси по осадке конуса, см; V<sub>В.В</sub> – воздухововлечение смеси, %; R<sub>0</sub> – предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток, МПа; F<sub>2</sub> – марка морозостойкости по ГОСТ 10060 [30], испытание ускоренным методом; W – марка по водонепроницаемости, МПа.

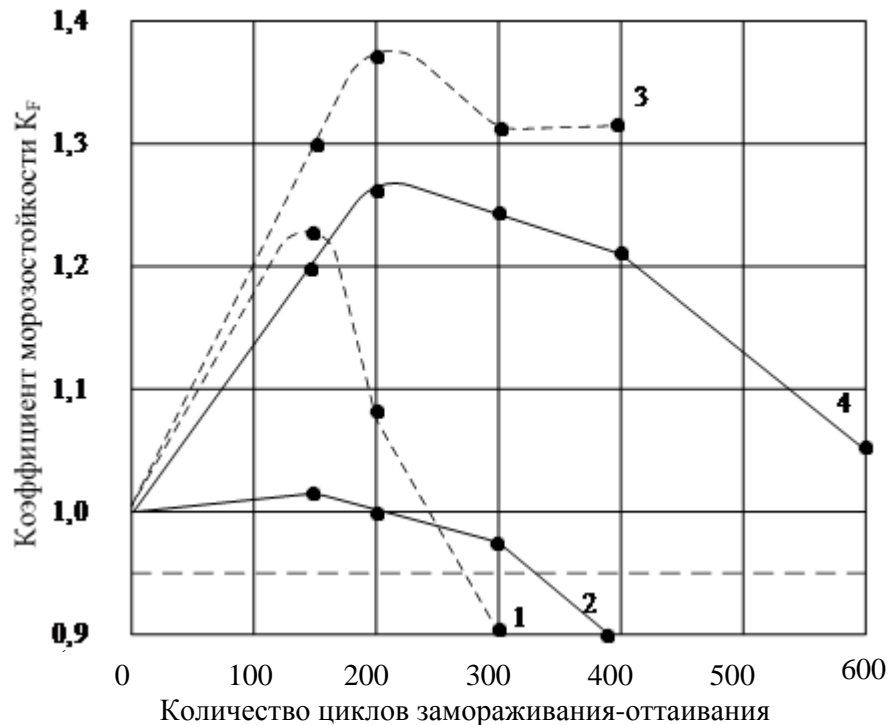


Рис. 3.22. Зависимость морозостойкости бетона от воздуходержания бетонной смеси (испытания по второму базовому методу ГОСТ 10060). Цифрами обозначены составы бетона по таблице 3.7

Результаты свидетельствуют о влиянии на морозостойкость количества воздуха в бетонной смеси. Однако не исключено, что это связано с видом воздухововлекающей добавки. Бетоны с комплексной добавкой СНВ+ПФМ имеют более высокую морозостойкость, чем бетоны с одной добавкой ПФМ-НЛК. Как видно, базовый состав бетона (состав № 4, таблица 3.7), показатели качества которого рекомендованы для эксплуатации в агрессивных средах класса XF4 [62] с долговечностью 50 лет, имеет марку по морозостойкости

более F<sub>2</sub>600. Это минимум в 2 раза превышает марку по морозостойкости бетона состава № 1, который не соответствует по одному показателю качества – объему вовлеченного воздуха в бетонной смеси.

Следует отметить, что после 600 циклов ЗО наблюдается снижение K<sub>F</sub> до 1,05. Это свидетельствует, с одной стороны, о высокой стойкости бетона, с другой – о начале процесса деградации бетона. Поскольку испытания не проведены до разрушения бетона, трудно прогнозировать кинетику дальнейшего процесса деградации.

Проведены сравнительные исследования влияния четырех стандартных режимов испытаний (таблица 3.8) на морозостойкость состава № 4 (таблица 3.7), которые показали, что стойкость бетона с воздухововлекающей добавкой к циклам ЗО в значительной степени зависит от температуры и среды замораживания. Испытания по базовому методу при замораживании на воздухе при температуре  $-(18\pm 2)^\circ\text{C}$  оказались менее суровыми (рис. 3.23). После 600 циклов ЗО бетоны имели K<sub>F</sub> в пределах 1,31-1,45, а при температуре замораживания  $-50^\circ\text{C}$  в солевом растворе бетон после 100 циклов ПЗО имел K<sub>F</sub> = 1,04.

Таблица 3.8

## Методы и режимы испытания бетона на морозостойкость

Метод испытания на морозостойкость	Режим испытаний			
	Замораживание		Оттаивание	
	Среда, температура	Время, ч	Среда (насыщение и оттаивание), температура	Время, ч
1. ГОСТ 10060, базовый, F <sub>2</sub> (второй метод)	Воздушная, $-(18\pm 2)^\circ\text{C}$	2,5	5 %-ный водный раствор NaCl, $(20\pm 2)^\circ\text{C}$	2,5
2. ГОСТ 10060 ускоренный, F <sub>2</sub> (третий метод)	5 %-ный водный раствор NaCl, $-(50\pm 2)^\circ\text{C}$	2,5	5 %-ный водный раствор NaCl, $(20\pm 2)^\circ\text{C}$	2,5
3. ГОСТ 10060, базовый, F <sub>1</sub> (первый метод)	Воздушная, $-(18\pm 2)^\circ\text{C}$	2,5	Пресная вода, $(20\pm 2)^\circ\text{C}$	2,5
4. ГОСТ 4800-59 [60]*	Воздушная, $-(18\pm 2)^\circ\text{C}$	2,5	Морская вода с соленостью 35‰,	2,5

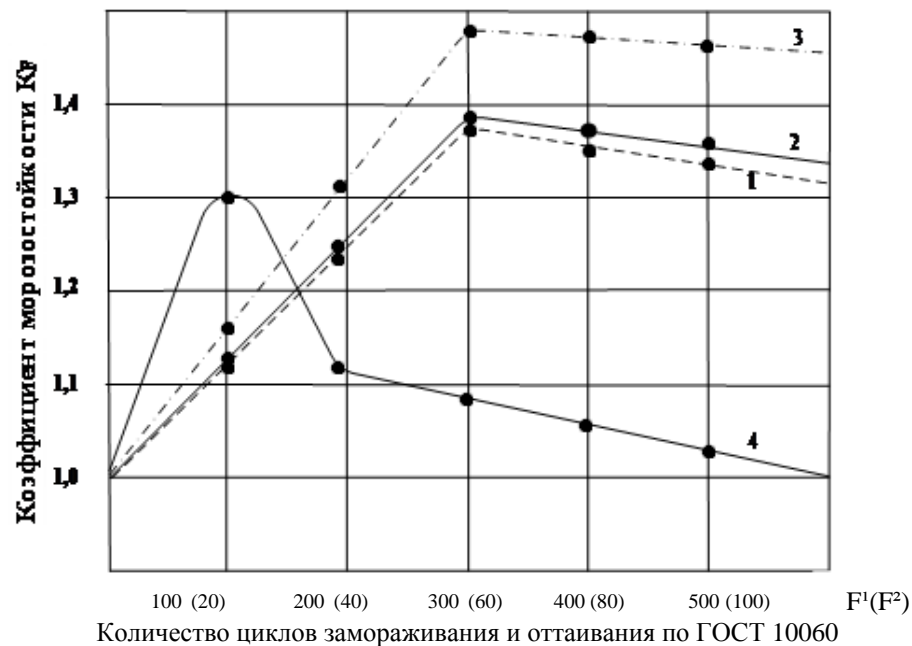


			(20±2) °С	
--	--	--	-----------	--

\*ГОСТ 4800-59 [60] предусматривает продолжительность замораживания и оттаивания 4 часа.

Результаты показывают, что при ограничении В/Ц, расхода цемента и применении воздухововлекающих добавок можно получать высокую морозостойкость независимо от температуры замораживания бетона  $t_F$  и среды замораживания  $F$ .

Результаты лабораторных исследований, представленные в разделе 3.3.1 и на рис. 3.23, являются подтверждением того, что для водонасыщенного бетона есть температурные фазы, в которых он не чувствителен к температуре замораживания [101]. Эта чувствительность зависит от структуры пор бетона. Следует отметить, что эти результаты характеризуют бетон, твердевший в нормальных условиях.



$F^1$  - циклы ПЗО по режиму второго базового метода для графиков 1, 2, 3;  
 $F^2$  - циклы ПЗО по режиму третьего метода ускоренных испытаний для графика 4;  
 1- оттаивание образцов в пресной воде;  
 2- оттаивание образцов в 5 %- ном растворе NaCl;  
 3- оттаивание образцов в морской воде с соленостью 35 ‰;  
 4- вмораживание образцов в 5 %- ный водный раствор NaCl при минус 50 °С.  
 $K_F$  - коэффициентом морозостойкости ( $K_F = R_F / R_0$ , где  $R_0$  - прочность при сжатии перед началом испытания, МПа;  $R_F$  - прочности при сжатии после испытания, МПа).

Рис. 3.23. Влияние среды замораживания на морозостойкость бетона с воздухововлекающими добавками

При стандартных испытаниях на морозостойкость по третьему ускоренному методу (вмораживание образцов в 5 %-ный водный раствор NaCl при  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) трудно выявить преобладающий фактор суровости (рис. 3.23, кривая 4). Это может быть связано как с более низкой температурой замораживания, так и со средой замораживания. Метод вмораживания наиболее приемлем для оценки морозостойкости бетона на участках обледенения морских сооружений и бортовых камней на автомобильных дорогах.

Представленные выше результаты исследований дают основания считать, что кинетику водонасыщения бетона определяет во многом механизм замораживания. Для разработки методов прогнозирования долговечности бетона в условиях морозного воздействия важно знать как механизм замораживания бетона в конструкции, так и влияние состава бетона и его структуры на процессы водонасыщения.

В соответствии с программой исследований качественные показатели бетона определяли в конструкциях сооружения КЗ-1 и КЗ-2. Методика оценки показателей качества бетона в сооружениях КЗ-1 и КЗ-2 принципиально не отличалась от методики, использованной при обследовании бетона в сооружении К1. Однако при обследовании сооружений КЗ-1 и КЗ-2 оценивали бетон только на горизонтальном участке зоны переменного уровня (рис. 3.24).

Исходя из общепринятых теоретических положений о морозном разрушении и результатах обследования сооружений КЗ-1 и КЗ-2, на участках В и С (рис. 3.2) при длительном обледенении конструкций, очевидно, создаются условия для влагопереноса в порах к границе промерзания. За счет этого в порах бетона может происходить водонасыщение до критической степени [56]. В результате на границе промерзания создаются условия для разрушения поверхностного слоя в виде отслаивания корки бетона. Исследования показывают, что наиболее уязвимы, с точки зрения морозного воздействия, участки конструкций, где бетон подвержен длительному обледенению. Это проявилось на объектах КЗ-2

(рис. 3.24). После первого зимнего сезона на участках обледенения разрушился поверхностный слой бетона в виде отслоения корки.



Рис. 3.24. Общий вид работ по отбору проб и испытанию бетона на объекте КЗ-1 (а, б) и КЗ-2 (в, г)

Сравнение показателей качества бетона в конструкциях сооружений К1 (таблица 3.7) и КЗ-2 (таблица 3.9) показывает, что бетон в сооружении КЗ-2 к началу морозного воздействия имел более высокие показатели качества, чем у бетона сооружения К1. Поэтому применение современной технологии бетона должно было положительно отразиться на долговечности конструкций в сооружении КЗ-3. Однако в действительности этого не произошло. Принципиальным отличием в технологии могло стать то, что в бетонах для сооружения КЗ-3 применяли подвижные бетонные смеси, для которых характерно высокое содержание свободной воды в структуре бетона к началу его замораживания. Влияние этого фактора на морозостойкость бетона отмечено во многих работах [10, 19, 34]. Отмечают, что для

морозостойкости более важным показателем является не В/Ц, а общее содержание воды в единице объема бетона [34].

Таблица 3.9

## Показатели качества бетона в сооружениях КЗ-1 и КЗ-2

Индекс сооружения и конструкции	Срок эксплуатации, год	Прочность при сжатии, МПа		Марка F, циклы	Марка W, МПа
		R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>		
<b>КЗ-1</b> (участок С): Секция 3 Секция 4	7				
		36,9	56,0	300	-
		40,9	51,2	300	-
<b>КЗ-2</b> (участок С): Секция 1 Секция 2 Секция 3 Секция 4	1				
		35,4	32,1	150	< 0,4
		34,9	32,0	200	< 0,4
		33,8	32,7	100	< 0,4
		26,9	29,3	150	< 0,4

Примечания: R<sub>1</sub> – прочность бетона по методике с ГОСТ 28570 [86] (испытание образцов-цилиндров); R<sub>2</sub> – по методике ГОСТ 22690 [85] (отрыв со скалыванием)

Аналогичные разрушения можно наблюдать на поверхности бортовых камней на автодорогах, когда при их эксплуатации в зимний период используют химические антиобледенители. Поскольку, как известно, наибольшие разрушения бетона происходят при контакте с минерализованной водой низкой концентрации (2-4 %), которая соответствует солености морской воды дальневосточных морей (31-33 ‰).

### Выводы по главе 3

1. Применение современной технологии бетонных работ на основе добавок ПАВ не является гарантией долговечности бетона в конструкциях. Высокие показатели по долговечности бетона можно получить на основе традиционных подходов к технологии бетонных работ. Разрушение бетона в конструкциях зоны переменного уровня обусловлены несоответствием показателей свойств бетона условиям эксплуатации. Долговечность бетона в зоне переменного уровня воды в ранний период структурообразования

определяется двумя критическими показателями: механизмом замораживания бетона и условиями твердения к началу морозного воздействия. Стандартная оценка морозостойкости позволяет оценить эффективность воздухововлекающей добавки количественно только для механизма замораживания, в котором преобладают циклы ЗО.

2. Основной показатель стойкости бетона в зоне переменного уровня воды – морозостойкость, необходимо адаптировать к условиям длительного замораживания в условиях обледенения. На участках обледенения конструкций может происходить слоистый вид разрушения бетона после первого зимнего периода, который не соответствует двум классическим видам разрушений: объемному и поверхностному.

3. Современная технология бетона, основанная на применении воздухововлекающих ПАВ и методах интенсификации набора прочности бетона путем пропаривания, вызывает расширение видов разрушений бетона. Установленные виды и характер разрушений бетона свидетельствует о необходимости дифференцировано подходить к назначению технологии бетона для различных участков зоны переменного уровня воды с учетом механизмов замораживания и разрушения бетона.

4. Характер и объем разрушений бетона после первого зимнего сезона дает основание считать, что совершенствование технологии бетонных работ для портового строительства целесообразно строить на основе реальной работы бетона в сооружении при морозном воздействии с учетом механизма замораживания бетона в конструкции. Наблюдаемые разрушения бетона в конструкциях портовых сооружений после первого года эксплуатации необходимо связывать с процессами переноса влаги в порах бетона. Поэтому технологические приемы следует разрабатывать с целью снижения чувствительности бетона к процессам влагопереноса в условиях длительного замораживания и обледенения. Агрессивность морской воды по отношению к арматуре при защитном слое 80 мм не проявляется при сохранении высокой стойкости бетона к морозному воздействию.

## **ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ЦИКЛА «ЗАМОРАЖИВАНИЕ – ОТТАИВАНИЕ» В ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ**

### **4.1. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА**

В предыдущих главах рассмотрены аспекты физического взаимодействия железобетонной конструкции гидротехнического сооружения в условиях контакта его поверхности с морской акваторией переменного уровня.

При этом поверхность твердой фазы находится в постоянном контакте со средой трех физических состояний: газ и жидкость с одной стороны, твердая фаза (грунтовый массив) – с другой. Кроме того, с внешней стороны добавляется и твердая фаза: лед.

Практика эксплуатации сооружений показывает, что на материал конструкций деструктивные воздействия сред возможны по следующим механизмам, которые по степени нарастания негативных факторов могут быть расположены в следующей последовательности:

- Первым и, вероятно, наименее разрушительным является воздействие почвенных вод, находящихся в грунтовом массиве. Эти воды, движущиеся в фильтрационном режиме в почвенных грунтах, содержат растворенные соли, образующиеся как в результате действия природных микроорганизмов, так и попавшие в почву в результате техногенных аварий.

- Вторым фактором, наиболее агрессивным, является «палитра» химических соединений, находящихся в морской акватории. Именно солевая коррозия гидротехнических сооружений является мощнейшим фактором снижения долговечности материалов, из которых они изготовлены [8, 10].

- Третьим фактором является взаимодействие поверхности сооружения с двухфазным газо-жидкостным потоком морской акватории. Именно в

результате этого взаимодействия происходит циклическое омывание поверхности конструкции жидкостью, которая затекает в пористую структуру бетона, заполняет поры цементного камня всех «спецификаций»: открытые, замкнутые, сквозные. Это необходимо учитывать, поскольку одной из важнейших характеристик пористой структуры твердой фазы является функция распределения пор по размерам.

Именно наличие этого фактора приводит к тому, что при понижении температуры окружающей воздушной среды вода, находящаяся в капиллярах различного размера замерзает при разных температурах. Возникающие при этом температурные напряжения являются одной из причин трещинообразования и, следовательно, последующего снижения прочности материала конструкции.

Для изучения особенностей процессов разрушения бетонов под влиянием солевой и морской агрессии целесообразно синтезировать математическую модель теплообменных процессов в бетонной модельной пластине на этапах замораживания и оттаивания.

#### **4.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕПЛОПЕРЕНОСА НА СТАДИИ ОХЛАЖДЕНИЯ**

Приняв за основу «характер» развития динамики температурных полей в пластине в соответствии с рис. 3.2, покажем на рис. 4.1 развитие картины температурных профилей во времени процесса. Полагаем, что в начальный момент времени, принимаемый как  $\tau = \tau_0$ , распределение температур в бетоне и грунте может быть обозначено как:

$$T_b(x, \tau)|_{\tau=0} = T_{гм}(x, \tau)|_{\tau=0} = T_0. \quad (4.1)$$

Здесь:  $T_b$  – температура бетона;  $T_{гм}$  – температура грунтового массива;  $T_0$  – начальное значение температуры;  $x$  – координата, м;  $\tau$  – время, с;

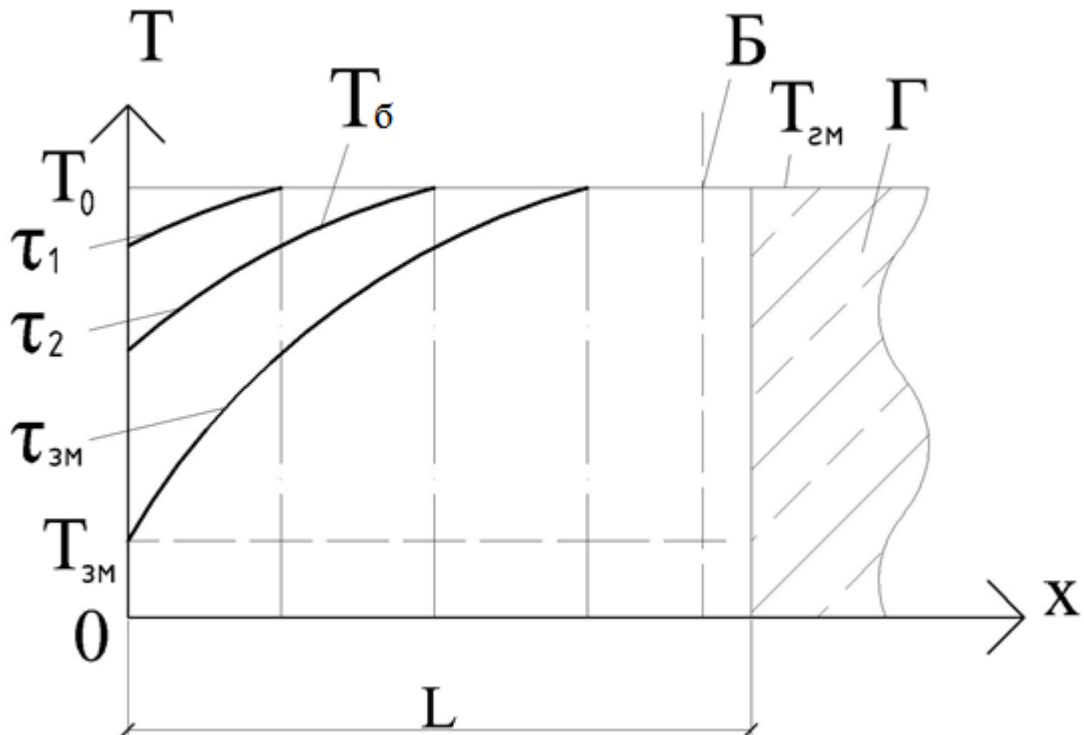


Рис. 4.1. Профили температур в системе «бетон – грунт» на ранней стадии охлаждения: Б – бетон, Г – грунт

Железобетонное сооружение представляется в виде неограниченной пластины размером  $L$ . Полагаем, что бетон насыщен влагой. Безусловно, структура бетона такова, что его пористую часть в общем виде необходимо рассматривать как состоящую из всех разновидностей пор (по классификации академика П.А. Ребиндера).

Итак, в момент времени, принимаемый за начало отсчета  $\tau = \tau_0$ , температура наружной поверхности начинает изменяться (понижаться). И это изменение не происходит скачкообразно, а является постепенным. И это изменение может быть охарактеризовано некоей зависимостью  $T_{\text{пов}} = f(\tau)$ .

Заметим, что в соответствии с принципами математической логики любую непрерывную функцию можно представить непрерывной цепью гистограмм. Такое представление дает возможность для моделирования процессов нестационарного теплопереноса применять «метод микропроцессов», положительно зарекомендовавший себя в трудах научной школы академика РААСН С.В. Федосова и члена-корреспондента РААСН В.Е. Румянцевой [102-104].



Предварительно условимся при рассмотрении моделируемых задач присвоить индекс «1» для замерзающей зоны, индекс «2» – для незамерзающей («талой») зоны.

В этих условиях задача теплообмена будет рассматриваться только до того момента, пока значение температуры на поверхности не достигнет значения  $T_{зм}$ . Этому моменту будет соответствовать значение времени  $\tau_{лк}$ .

Краевая задача нестационарной теплопроводности запишется в виде:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2(x, \tau)}{\partial x^2}; \quad \tau > 0; \quad 0 \leq x \leq L, \quad (4.2)$$

$$T_2(x, \tau)|_{\tau=0} = T_0(x), \quad (4.3)$$

$$T_2(x, \tau)|_{x=0} = T_{хл}(\tau), \quad (4.4)$$

$$T_2(x, \tau)|_{x=L} = T_0. \quad (4.5)$$

Для удобства проведения математических выкладок и последующего численного анализа приведем задачу (4.2)-(4.5) к безразмерному виду, обозначив:

$$\bar{x} = \frac{x}{L}; \quad Fo_2 = \frac{a_2 \tau}{L^2}; \quad a_2 = \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_2}; \quad (4.6)$$

$$\theta_2(\bar{x}, Fo_2) = \frac{T_2(x, \tau) - T_{хл}}{T_0 - T_{хл}}. \quad (4.7)$$

С учетом этих подстановок уравнение (4.2) приводится к виду:

$$\frac{\partial \theta_2(\bar{x}, Fo_2)}{\partial Fo_2} = \frac{\partial^2 \theta_2(\bar{x}, Fo_2)}{\partial \bar{x}^2}. \quad (4.8)$$

Начальное условие (4.3) запишется следующим образом:

$$\theta_2(\bar{x}, Fo_2)|_{Fo_2=0} = \theta_0(\bar{x}). \quad (4.9)$$

Для граничного условия (4.4) получаем:

$$\theta_2(\bar{x}, Fo_2)|_{\bar{x}=0} = \frac{T_2(x, \tau)|_{x=0} - T_{хл}}{T_0 - T_{хл}} = 0. \quad (4.10)$$

Граничное условие (4.5) примет вид:

$$\theta_2(\bar{x}, Fo_2)|_{\bar{x}=1} = \frac{T_2(x, \tau)|_{x=L} - T_{хл}}{T_0 - T_{хл}} = 1. \quad (4.11)$$

Получим решение краевой задачи (4.8)-(4.11) методом интегрального преобразования Лапласа [102, 103]. Для этого переводим выражение (4.8) в область изображений по Лапласу по временной переменной:

$$\frac{\partial^2 \theta_2(\bar{x}, s)}{\partial \bar{x}^2} - s\theta_2(\bar{x}, s) + \theta_0(\bar{x}) = 0. \quad (4.12)$$

Нетрудно показать, что решение данного обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка может быть представлено в виде:

$$\theta_2(\bar{x}, s) = A \cdot ch(\sqrt{s}\bar{x}) + B \cdot sh(\sqrt{s}\bar{x}) - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{x}} \theta_0(\xi) \cdot sh[\sqrt{s}(\bar{x} - \xi)] d\xi. \quad (4.13)$$

Здесь,  $\xi$  – безразмерная переменная координата в интервале  $0 \leq \xi \leq \bar{x}$ . Граничные условия (4.10) и (4.11) в области изображений по Лапласу запишутся так:

$$L[\theta_2(\bar{x}, F_{O_2})|_{\bar{x}=0}] = 0, \quad (4.14)$$

$$L[\theta_2(\bar{x}, F_{O_2})|_{\bar{x}=1}] = \frac{1}{s}. \quad (4.15)$$

Используем условие (4.14) для подстановки в выражение (4.13):

$$\theta_2(0, s) = A \cdot \underbrace{ch(\sqrt{s}0)}_1 + B \cdot s \underbrace{h(\sqrt{s}0)}_0 = 0. \quad (4.16)$$

Учтено, что интеграл обращается в ноль.

Отсюда следует, что  $A = 0$ .

Используем условие (4.15):

$$B \cdot sh(\sqrt{s}1) - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^1 \theta_0(\xi) \cdot sh[\sqrt{s}(1 - \xi)] d\xi = \frac{1}{s}. \quad (4.17)$$

Отсюда для константы  $B$  получаем:

$$B = \frac{1}{s \cdot sh(\sqrt{s})} + \frac{1}{\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s})} \int_0^1 \theta_0(\xi) \cdot sh[\sqrt{s}(1 - \xi)] d\xi. \quad (4.18)$$

Далее, подставляя (4.18) в решение (4.13), с учетом того, что  $A = 0$ , получаем:

$$\theta_2(\bar{x}, s) = \frac{sh(\sqrt{s}\bar{x})}{s \cdot sh(\sqrt{s})} + \frac{sh(\sqrt{s}\bar{x})}{\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s})} \int_0^1 \theta_0(\xi) \cdot sh[\sqrt{s}(1 - \xi)] d\xi - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\bar{x}} \theta_0(\xi) \cdot sh[\sqrt{s}(\bar{x} - \xi)] d\xi. \quad (4.19)$$

Возвращение в область оригиналов осуществляется по формуле:

$$L^{-1}[\theta_2(\bar{x}, s)] = L^{-1} \left[ \frac{\varphi(s)}{\psi'(s)} \Big|_{s=0} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\varphi(s_i)}{\psi'(s_i)} \exp(s_i \tau) \right]. \quad (4.20)$$

Здесь:  $\varphi(s)$  и  $\psi(s)$  – полиномы относительно  $s$ .

Таким образом, очень важным должно быть условие, чтобы числитель и знаменатель являлись полиномами относительно  $s$ . При этом,  $s_i$  – корни характеристического уравнения:

$$\psi(s) = 0. \quad (4.21)$$

Для данного случая:

$$sh(\sqrt{s}) = 0 \rightarrow \sin(\mu_n) = 0. \quad (4.22)$$

Переходя от гиперболических функций к тригонометрическим, запишем:

$$sh(\sqrt{s}) \rightarrow \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}) \Rightarrow \sin(\mu_n) = 0. \quad (4.23)$$

И тогда,  $\mu_n$  – корни характеристического уравнения, будут определяться так:

$$\mu_n = \pi n. \quad (4.24)$$

Согласно процедуре возвращения из области изображений в область оригиналов необходимо проверить, являются ли функции числителя и знаменателя в выражении (4.19) полиномами относительно  $s$ .

Разложение в степенной ряд дает следующие записи:

$$\varphi(s) = sh(\sqrt{s}\bar{x}) \Rightarrow (\sqrt{s}\bar{x}) + \frac{(\sqrt{s}\bar{x})^3}{3!} + \frac{(\sqrt{s}\bar{x})^5}{5!} + \dots, \quad (4.25)$$

$$\psi(s) = s \cdot sh(\sqrt{s}) \Rightarrow s \cdot \left[ \sqrt{s} + \frac{\sqrt{s}^3}{3!} + \frac{\sqrt{s}^5}{5!} + \dots \right]. \quad (4.26)$$

Очевидно, что выражения (4.25) и (4.26) не являются полиномами относительно  $s$ , но легко к ним приводятся умножением или делением на  $\sqrt{s}$ . В таком случае условия второй теоремы разложения соблюдены и возможна процедура перевода выражения (4.19) в область оригиналов с соблюдением почленной очередности.

Для начала проверим, имеется ли нулевой корень у первого слагаемого правой части.

Вынося за скобку в числителе и знаменателе  $\sqrt{s}$ , получаем:

$$\sqrt{s} \cdot \varphi_1(s) = \bar{x} + \frac{s\bar{x}^3}{3!} + \frac{s^2\bar{x}^5}{5!} + \dots, \quad (4.27)$$

$$\sqrt{s} \cdot \psi_1(s) = s \cdot \left[ 1 + \frac{s}{3!} + \frac{s^2}{5!} + \dots \right]. \quad (4.28)$$

Очевидно, что при значении  $s = 0$  для числителя будем иметь:

$$[\sqrt{s} \cdot \varphi_1(s)]|_{s=0} = \bar{x}. \quad (4.29)$$

Дифференцируя выражение (4.28) по  $s$ , получаем:

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} \left[ s \cdot \left( 1 + \frac{s}{3!} + \frac{s^2}{5!} + \dots \right) \right] \Big|_{s=0} &= \\ &= s' \cdot \left[ 1 + \frac{s}{3!} + \frac{s^2}{5!} + \dots \right] \Big|_{s=0} + s \cdot \left[ 1 + \frac{s}{3!} + \frac{s^2}{5!} + \dots \right]' \Big|_{s=0} = \\ &= 1. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Отсюда следует, что нулевой корень существует и равен:

$$L^{-1} \left[ \frac{\varphi(s)}{\psi'(s)} \right] \Big|_{s=0} = \frac{\bar{x}}{1} = \bar{x}. \quad (4.31)$$

Далее, в соответствии с формулой обращения имеем:

$$L^{-1} \left[ \frac{\varphi(s)}{\psi'(s)} \right] = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin(\pi n \bar{x}) \exp(-\pi^2 n^2 F_0). \quad (4.32)$$

Перейдем к рассмотрению второго слагаемого в выражении (4.19). Предварительно преобразуем его, внося под знак интеграла множитель:

$$\begin{aligned} \frac{sh(\sqrt{s}\bar{x})}{\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s})} \int_0^1 \theta_0(\xi) \cdot sh[\sqrt{s}(1 - \xi)] d\xi = \\ = \int_0^1 \theta_0(\xi) \cdot \left\{ \frac{sh(\sqrt{s}\bar{x}) \cdot sh[\sqrt{s}(1 - \xi)]}{\sqrt{s} \cdot sh(\sqrt{s})} \right\} d\xi. \end{aligned} \quad (4.33)$$

Упростим числитель выражения, находящегося в фигурной скобке, используя свойство гиперболических функций:

$$\begin{aligned} \varphi(s) &= sh(\sqrt{s}\bar{x}) \cdot sh[\sqrt{s}(1 - \xi)] \\ &= sh(\sqrt{s}\bar{x}) \\ &\quad \cdot [sh(\sqrt{s} \cdot 1) \cdot ch(\sqrt{s} \cdot \xi) - ch(\sqrt{s} \cdot 1) \cdot sh(\sqrt{s} \cdot \xi)]. \end{aligned} \quad (4.34)$$

С учетом характеристического уравнения (4.23) получаем:

$$\varphi(s) = -sh(\sqrt{s}\bar{x}) \cdot ch(\sqrt{s}) \cdot sh(\sqrt{s} \cdot \xi). \quad (4.35)$$

Разложим в ряд множители и проверим наличие нулевого корня:

$$\begin{aligned} \varphi(s) &= - \left[ (\sqrt{s}\bar{x}) + \frac{(\sqrt{s}\bar{x})^3}{3!} + \frac{(\sqrt{s}\bar{x})^5}{5!} + \dots \right] \cdot \left[ 1 + \frac{(\sqrt{s})^2}{2!} + \frac{(\sqrt{s})^4}{4!} + \dots \right] \\ &\quad \cdot \left[ (\sqrt{s}\xi) + \frac{(\sqrt{s}\xi)^3}{3!} + \frac{(\sqrt{s}\xi)^5}{5!} + \dots \right] \\ &\Rightarrow s \left[ \bar{x} + \frac{s \cdot \bar{x}^3}{3!} + \frac{s^2 \bar{x}^5}{5!} + \dots \right] \cdot \left[ 1 + \frac{s}{2!} + \frac{s^2}{4!} + \dots \right] \\ &\quad \cdot \left[ \xi + \frac{s \cdot \xi^3}{3!} + \frac{s^2 \xi^5}{5!} + \dots \right]. \end{aligned} \quad (4.36)$$

Очевидно, что наличие множителя  $s$  определяет отсутствие нулевого корня при  $s = 0$ .

Переводим в область тригонометрических функций формулу (4.35):

$$L^{-1}[\varphi_2(s)] = -\frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}\bar{x}) \cos(i\sqrt{s}) \cdot \frac{1}{i} \sin(i\sqrt{s}\xi). \quad (4.37)$$

И, учитывая, что  $i^2 = -1$ , а  $i\sqrt{s} = \mu$ , получаем:

$$L^{-1}[\varphi_2(s)] = \sin(\mu\bar{x}) \cos(\mu) \sin(\mu\xi). \quad (4.38)$$

Дифференцируем функцию знаменателя дроби в выражении (4.33):

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds}[\psi_2(s)] &= (\sqrt{s})' \cdot sh(\sqrt{s}) + \sqrt{s} \cdot [sh(\sqrt{s})]' \\ &= \frac{1}{2\sqrt{s}} \cdot sh(\sqrt{s}) + \sqrt{s} \cdot \frac{1}{2\sqrt{s}} \cdot ch(\sqrt{s}) \Rightarrow \frac{1}{2} ch(\sqrt{s}) \\ &= \frac{1}{2} \cos(i\sqrt{s}) \end{aligned} \quad (4.39)$$

Подстановка в скобку выражения (4.33) дает:

$$\{\sim\} = \frac{2 \sin(\mu\bar{x}) \cos(\mu) \sin(\mu\xi)}{\cos(\mu)} = 2 \sin(\mu\bar{x}) \sin(\mu\xi). \quad (4.40)$$

Окончательно второе слагаемое в области оригиналов примет вид:

$$\begin{aligned} L^{-1}[\varphi(s)] &= 2 \int_0^1 \theta_0(\xi) \cdot \sin(\mu\bar{x}) \cdot \sin(\mu\xi) d\xi \\ &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\mu_n\bar{x}) \int_0^1 \theta_0(\xi) \cdot \sin(\mu_n\xi) d\xi \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo). \end{aligned} \quad (4.41)$$

И, наконец, с учетом выражений (4.31), (4.32) и (4.41) окончательное решение краевой задачи нестационарной теплопроводности (4.8)-(4.11) запишется в виде:

$$\begin{aligned} \theta_2(\bar{x}, Fo_2) &= \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin(\pi n\bar{x}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_2) \\ &+ 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\pi n\bar{x}) \int_0^1 \theta_0(\xi) \cdot \sin(\pi n\xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_2). \end{aligned} \quad (4.42)$$

Рассмотрим частный случай равномерного начального распределения температур:

$$\theta_0(\bar{x}) = \theta_0 = 1. \quad (4.43)$$

В этом случае для интеграла в выражении (4.42) запишем:

$$\int_0^1 \theta_0(\xi) \cdot \sin(\pi n\xi) d\xi = \theta_0 \frac{1}{\pi n} \int_0^1 \sin(\pi n\xi) d(\pi n\xi) = \theta_0 \frac{1}{\pi n} [1 - (-1)^n]. \quad (4.44)$$

С учетом выражений (4.43) и (4.44) получаем:

$$\theta_2(\bar{x}, Fo_2) = \bar{x} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin(\pi n \bar{x}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_2) + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} [1 - (-1)^n] \sin(\pi n \bar{x}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_2). \quad (4.45)$$

### 4.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ДВУХСЛОЙНОМ ТЕЛЕ: «ЗАМЕРЗШАЯ – ТАЛАЯ» ЗОНЫ

При дальнейшем понижении температуры воздуха, а, следовательно, и поверхности до величины  $T_{\text{нп}}$ , на поверхности конструкции образуется слой промерзания толщиной  $\xi$ , размер которого постоянно возрастает, а граница замерзания начинает продвигаться внутрь конструкции, как это показано на рис. 4.2.

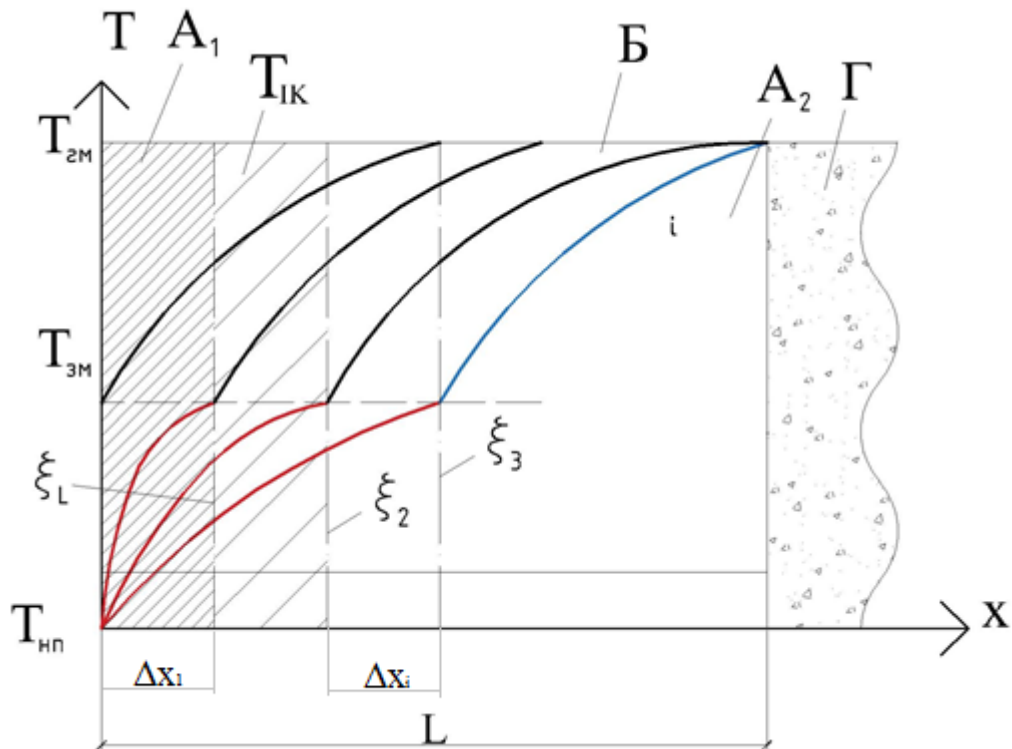


Рис. 4.2. Профили температур в системе «бетон – грунт»:  $T_{\text{Ик}}$  – профиль температур при  $\tau = \tau_{\text{Ик}}$

И вновь, рассмотрим, как будут развиваться ситуации для экстремального случая, когда температура на поверхности становится равной  $T_{\text{нп}}$ .

С этого момента в соответствии с физическими представлениями о процессах теплопереноса задача становится существенно более сложной. Конструктивный элемент А становится состоящим из двух частей:  $A_1$  – замерзший слой,  $A_2$  – незамерзший слой.

И уже необходимо рассматривать не только уравнение нестационарной теплопроводности для каждой из зон, обладающих граничными значениями температурных характеристик, но учитывать явления фазового перехода на границе раздела зон.

Для задачи теплопроводности в замерзшей зоне можно записать:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1(x, \tau)}{\partial x^2}; \tau > \tau_{\text{ИК}}; 0 \leq x \leq \xi(\tau). \quad (4.46)$$

Итак, фиксируем, что температура в замерзшей зоне меняется от  $T_{\text{нп}}$  (температура на наружной поверхности) до  $T_{\text{зм}}$  (температура замерзания). Температура в незамерзшей («талой») зоне меняется от  $T_{\text{зм}}$  до  $T_{\text{гм}}$  (температура грунта).

Введем безразмерные переменные вида:

- в «замерзшей» зоне:

$$\theta_1(\bar{x}_1, Fo_1) = \frac{T_1(x, \tau) - T_{\text{зм}}}{T_{\text{нп}} - T_{\text{зм}}}, \quad (4.47)$$

- в незамерзшей («талой») зоне:

$$\theta_2(\bar{x}_2, Fo_2) = \frac{T_2(x, \tau) - T_{\text{гм}}}{T_{\text{зм}} - T_{\text{гм}}}. \quad (4.48)$$

В этих условиях дифференциальные уравнения нестационарной теплопроводности примут вид:

- для зоны замерзания:

$$\frac{\partial \theta_1(\bar{x}_1, Fo_1)}{\partial Fo_1} = \frac{\partial^2 \theta_1(\bar{x}_1, Fo_1)}{\partial \bar{x}_1^2}; Fo_1 \geq 0; 0 \leq \bar{x}_1 \leq 1 \quad (0 \leq \bar{x}_1 \leq \xi); \quad (4.49)$$

- для «талой» зоны:



$$\frac{\partial \theta_2(\bar{x}_2, Fo_2)}{\partial Fo_2} = \frac{\partial^2 \theta_2(\bar{x}_2, Fo_2)}{\partial \bar{x}_2^2}; \quad Fo_2 \geq 0; \quad 0 \leq \bar{x}_2 \leq 1 \quad (\xi \leq \bar{x}_2 \leq L). \quad (4.50)$$

Соответствующим образом запишутся и начальные условия:

$$\theta_1(\bar{x}_1, Fo_1)|_{Fo_1=0} = \theta_{1.0}(\bar{x}_1), \quad (4.51)$$

$$\theta_2(\bar{x}_2, Fo_2)|_{Fo_2=0} = \theta_{2.0}(\bar{x}_2). \quad (4.52)$$

Соответствующие выражения для граничных условий примут вид:

- к уравнениям (4.49) и (4.41):

$$\theta_1(\bar{x}_1, Fo_1)|_{\bar{x}_1=0} = 1, \quad (4.53)$$

$$\theta_1(\bar{x}_1, Fo_1)|_{\bar{x}_1=1} = 0. \quad (4.54)$$

- к уравнениям (4.50) и (4.52):

$$\theta_2(\bar{x}_2, Fo_2)|_{\bar{x}_2=0} = 1, \quad (4.55)$$

$$\theta_2(\bar{x}_2, Fo_2)|_{\bar{x}_2=1} = 0. \quad (4.56)$$

Задача теплопереноса для двух зон, по сути, является моделью теплопереноса для двухслойной пластины. И в этих условиях в месте контакта пластин, имеющих разные теплофизические характеристики (теплопроводность, теплоемкость, плотность), устанавливаются граничные условия IV-го рода.

Это означает, что в месте контакта пластин предполагается равенство температур и равенство тепловых потоков.

Условие равенства температур:

$$T_1(x_1, \tau)|_{x_1=\xi} = T_2(x_2, \tau)|_{x_2=\xi}. \quad (4.57)$$

Преобразуем данное выражение с использованием величины  $T_{3M}$  следующим образом:

$$T_1(x_1, \tau)|_{x_1=\xi} - T_{3M} = T_2(x_2, \tau) - T_{3M} + (T_{ГМ} - T_{ГМ}). \quad (4.58)$$

Отсюда:

$$T_1(x_1, \tau)|_{x_1=\xi} - T_{3M} = T_2(x_2, \tau) - T_{ГМ} - (T_{3M} - T_{ГМ}). \quad (4.59)$$

Поделим на  $(T_{НП} - T_{3M})$ :

$$\frac{T_1(x_1, \tau) - T_{3M}}{T_{НП} - T_{3M}} = \frac{T_2(x_2, \tau) - T_{3M}}{T_{НП} - T_{3M}}. \quad (4.60)$$

Умножим и разделим правую часть последнего выражения на величину  $(T_{3M} - T_{GM})$ . Опуская несложные, но громоздкие преобразования, можем записать:

$$K_T^* \cdot \theta_1(\bar{x}_1, Fo_1)|_{\bar{x}_1=\xi^*} = \theta_2(\bar{x}_2, Fo_2)|_{\bar{x}_2=\xi^*} - 1, \quad (4.61)$$

#### 4.4. РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТОДОМ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАПЛАСА

Начальное условие:

$$T_1(x, \tau)|_{\tau=\tau_{IK}} = T_{1.0}(x). \quad (4.62)$$

Граничное условие на поверхности:

$$T_1(x, \tau)|_{x=0} = T_{3M}. \quad (4.63)$$

Для незамерзшей зоны уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2(x, \tau)}{\partial x^2}; \quad \tau > \tau_{IK}; \quad \xi(\tau) \leq x \leq L. \quad (4.64)$$

Начальное условие покажет, что начальная температура замерзшей зоны:

$$T_2(x, \tau)|_{\tau=\tau_{IK}} = T_{3M}. \quad (4.65)$$

Граничное условие на правой стороне конструкции примем как и ранее:

$$T_2(x, \tau)|_{x=L} = T_{GM}. \quad (4.66)$$

Заметим, что выбранный подход позволит в дальнейшем определять теоретическое время достижения границы промерзания координаты  $L$ , т.е. полного промерзания конструкции.

Условие на границе раздела фаз общеизвестно [105] и для рассматриваемого случая может быть представлено так:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(\xi, \tau)}{\partial x} \pm r^* w \rho_1 \frac{d\xi}{d\tau} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2(\xi, \tau)}{\partial x}. \quad (4.67)$$

Уравнение (4.67) является законом теплообмена на границе зон. Наличие двойного знака « $\pm$ » означает периоды замерзания «-» или оттаивания «+».

Здесь  $\xi = \frac{x_2}{L-x_2}$  – безразмерная координата фронта промерзания.

Далее рассмотрим вторую составляющую граничного условия IV-го рода, записанную в форме выражения (4.67). При этом представим эту запись в следующем виде:

$$-\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\xi(\tau)} = q_1(\tau) + r^* w \rho_2 \frac{d\xi}{d\tau}. \quad (4.68)$$

Здесь обозначено:

$$q_1(\tau) = -\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\xi(\tau)}. \quad (4.69)$$

Еще раз обратим внимание на тот факт, что и по своему теплофизическому смыслу, и по размерности ( $q_1(\tau) = \text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ) эта величина характеризует плотность потока теплоты от границы раздела «зон» в мерзлую часть.

Преобразуем выражение (4.68) к безразмерному виду. Для этого, во-первых, поделим обе части на величину  $(T_{3M} - T_{GM})$ , а, во-вторых, на  $\lambda_2$ :

$$\begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial x_2} \left[ \frac{T_2(x, \tau) - T_{GM}}{T_{3M} - T_{GM}} \right] \Big|_{x_2=\xi(\tau)} &= \frac{q_1(\tau)}{\lambda_2 (T_{3M} - T_{GM})} + r^* w \rho_2 \cdot \frac{1}{\lambda_2} \cdot \frac{d\xi(\tau)}{d\tau} \cdot \frac{1}{T_{3M} - T_{GM}}. \end{aligned} \quad (4.70)$$

Учитывая выражение (4.71), а также, обозначив  $K_\lambda = \lambda_1/\lambda_2$ , после дальнейших преобразований получится выражение (4.72).

$$K_T^* = \frac{T_{HP} - T_{3M}}{T_{3M} - T_{GM}}. \quad (4.71)$$

$$-\frac{\partial \theta_2(\bar{x}_2, Fo_2)}{\partial \bar{x}_2} = Ki_1^*(Fo_1) \cdot K_\lambda \cdot K_T^* + Ko_2^* \frac{d\xi^*(Fo_2)}{dFo_2}. \quad (4.72)$$

Здесь для краткости записи обозначено:

$$Ki_1^* = \frac{q_1(\tau) \cdot (L - \xi)}{\lambda_1 \cdot (T_{\text{нп}} - T_{\text{зм}})}. \quad (4.73)$$

Эта запись [102, 106, 107] модифицированного критерия Кирпичева, который характеризует отношение потока теплоты, подводимой к поверхности (границе раздела), к потоку теплоты, отводимой внутрь тела.

$$Ko_2^* = \frac{r^* w}{c_2 \cdot (T_{\text{зм}} - T_{\text{гм}})}. \quad (4.74)$$

А эта запись – для модифицированного критерия Коссовича, отражающая зависимость между количеством теплоты, затрачиваемой на фазовый переход «замерзание – оттаивание» и на нагревание (охлаждение) влажного тела.

Некоторые результаты расчетов по разработанным математическим моделям процессов теплопереноса приведены на рис. 4.3 и рис. 4.4. Данные рис. 4.3 иллюстрируют динамику полей температур в железобетонной конструкции для случая, при котором происходит понижение температуры поверхности конструкции от значения  $T = 293 \text{ К}$  ( $+20 \text{ }^\circ\text{С}$ ) до температуры  $T = 252 \text{ К}$  ( $-21 \text{ }^\circ\text{С}$ ).

При этом, график изменения температуры выбран нелинейным: понижение происходит за время 10 часов. Очевидно, что за первый час температура понижается на 15 К, а за последний – на 3 К. Через три часа температура на поверхности бетона достигла значения 273 К ( $0 \text{ }^\circ\text{С}$ ).

Последующее понижение температуры приводит к нарастанию размера зоны мерзлого слоя. Анализ кривых линий полей температур позволяет найти формулу для скорости продвижения границы зон. Для рассматриваемого случая получено следующее выражение:

$$\xi^*(Fo_2) = 0,568(Fo_2)^{0,234}. \quad (4.75)$$

Кривые рис. 4.4 иллюстрируют динамику полей температур в железобетонной конструкции на стадии оттаивания. Заметим при этом, что начальным условием для расчетов динамики теплопереноса на стадии

оттаивания выбрано конечное распределение температур на стадии замерзания. А именно, нижняя кривая.

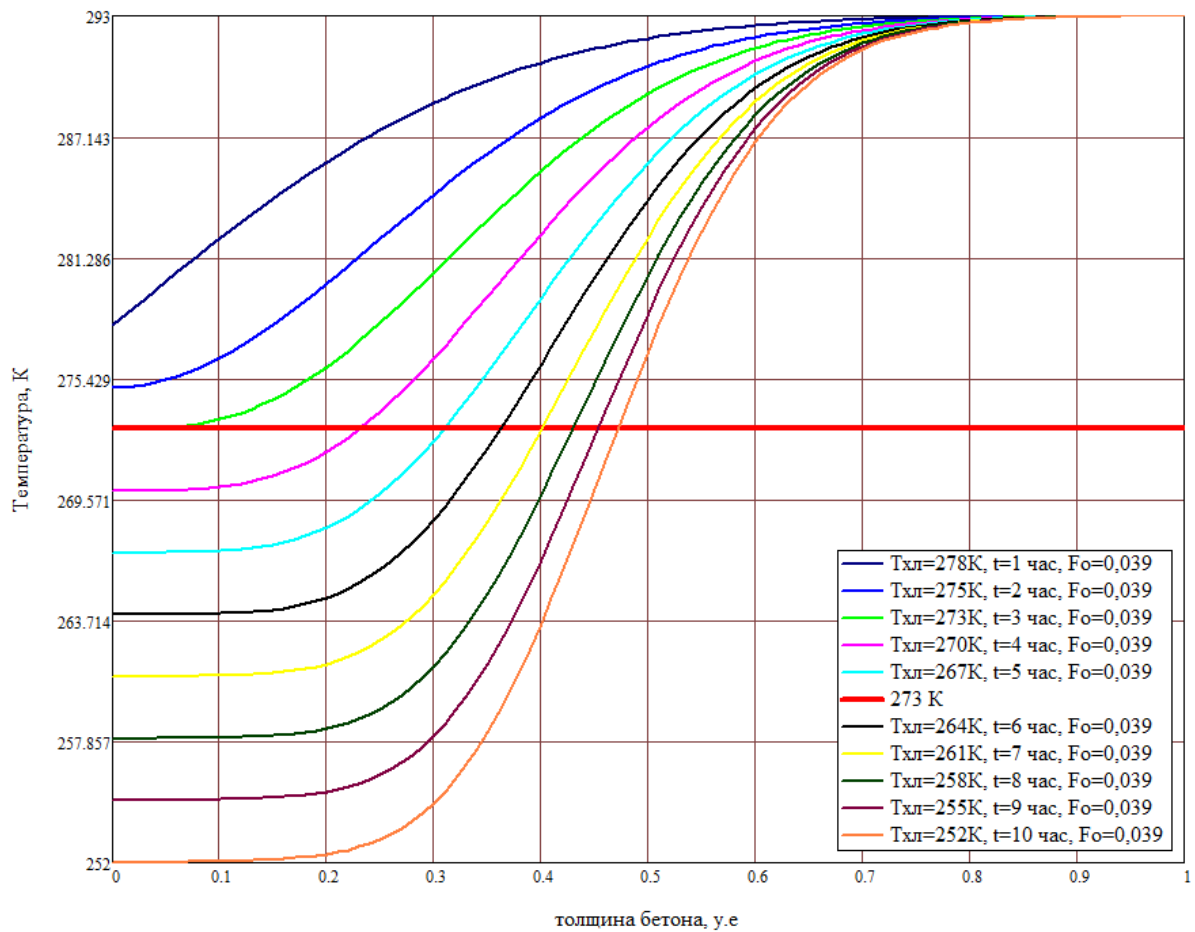


Рис. 4.3. Динамика полей температур в железобетонной конструкции при замерзании в течение 10 часов

Подчеркнем физичность разработанных математических моделей теплопереноса и корректность результатов расчетов с применением метода «микропроцессов». Кривые рис. 4.4 показывают четкую реакцию рассматриваемой системы на изменение внешних температурных условий. Отметим и еще один интересный момент. В условиях анализируемого примера кривые 1-4 пересекают линию  $T = 273 \text{ К}$  ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Знание этих параметров позволяет, по аналогии со стадией замерзания, определить формулу для расчетов кинетики движения границы раздела зон «замерзание – оттаивание» в обратном направлении. Покажем это на конкретных расчетах.

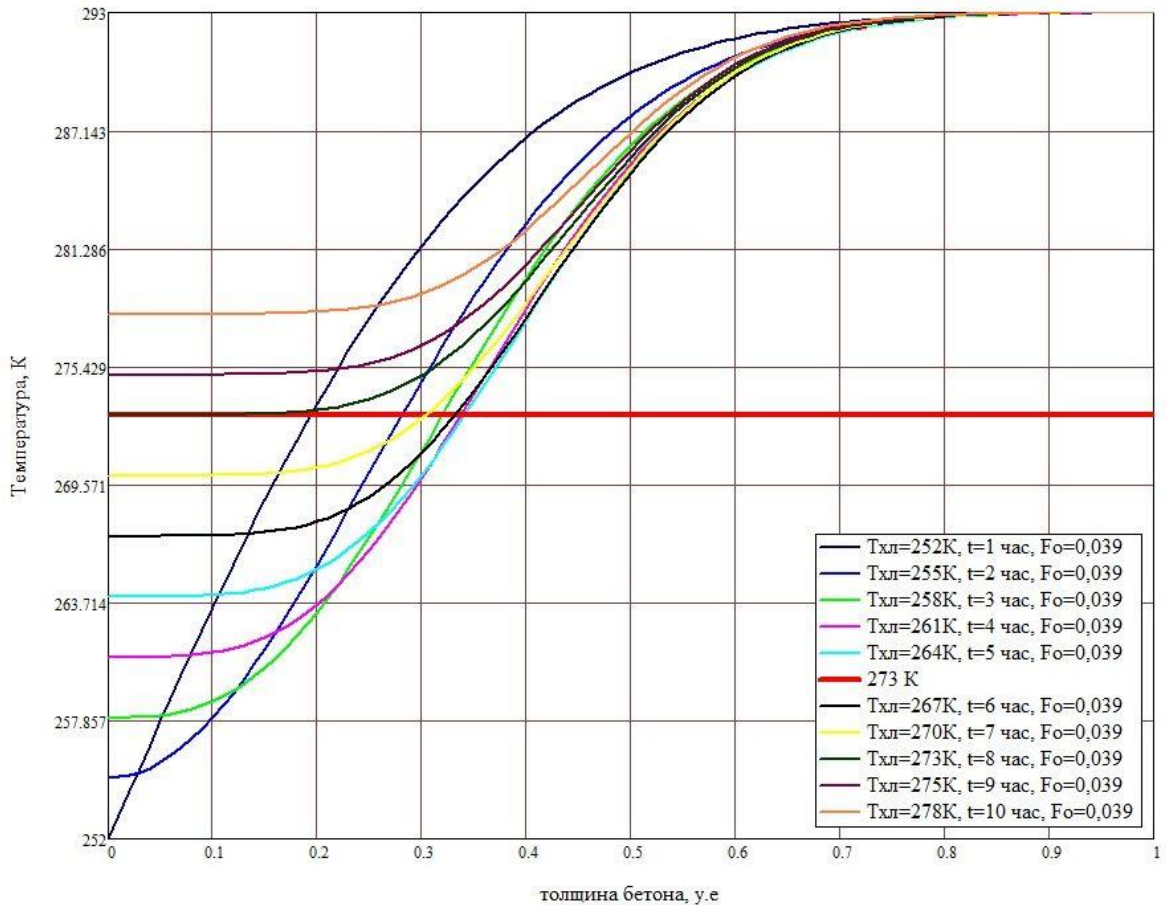


Рис. 4.4. Динамика полей температур в железобетонной конструкции на стадии оттаивания в течение 10 часов

Записываем, для кривых 3 и 4, полагая справедливость формулы:

$$\xi^*(Fo_3) = B(Fo_3)^m. \quad (4.76)$$

Здесь:  $Fo_3$  – число Фурье для стадии оттаивания железобетона.

Логарифмирование выражения (4.76) приводит к записи:

$$\ln[\xi^*(Fo_3)] = \ln B + m \ln Fo_3. \quad (4.77)$$

Подстановка соответствующих значений с графиков дает:

- для 3:

$$\ln[0,45] = \ln B + m \ln 0,117, \quad (4.78)$$

- для 4:

$$\ln[0,36] = \ln B + m \ln 0,155. \quad (4.79)$$

Опуская несложные преобразования, приведём решение системы двух уравнений относительно величин  $B$  и  $m$ :

$$B = 0,082; m = -0,793. \quad (4.80)$$

И, таким образом, явный вид уравнения (4.76) будет:

$$\xi^*(Fo_3) = 0,082(Fo_3)^{-0,793}. \quad (4.81)$$

Разумеется, приведенный математический анализ и его графическая иллюстрация в основном лишь качественно характеризуют тепловые процессы, протекающие в железобетонной конструкции на стадиях замораживания и оттаивания. Для выработки пакета конкретных рекомендаций необходима более детальная информация о статистических данных метеорологических наблюдений за погодными условиями в географической зоне расположения объекта. И, конечно же, необходимы исследования по определению теплофизических характеристик материала конструкции в зависимости от структурно-механических показателей железобетона, влажности и т.п.

#### **Выводы по главе 4**

1. Разработана математическая модель теплообменных процессов цикла «замораживание – оттаивание» в железобетонной конструкции гидротехнического сооружения, учитывающая явления фазового перехода на границе раздела зон. Предложено уравнение для расчета скорости продвижения границы зон промерзания и оттаивания.

2. Проведен математический и графический анализ, основанный на «методе микропроцессов» и качественно характеризующий тепловые процессы, протекающие в железобетонной конструкции на стадиях замораживания и оттаивания; выбранный подход позволяет определять теоретическое время достижения границы промерзания бетона.

## **ГЛАВА 5. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БЕТОНА В МОРСКОЙ ВОДЕ В УСЛОВИЯХ ЗАМОРАЖИВАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ**

Продолжительность жизненного цикла бетонных конструкций в морской воде в условиях замораживания-оттаивания, как правило, оценивается долговечностью на этапе эксплуатации. Однако качественные показатели для долговечности устанавливаются на этапе проектирования и формируются на этапе строительства. Долговечность как срок службы конструкции является показателем качества жизненного цикла (ЖЦ). Поэтому важно определить критические показатели каждого этапа, которые в итоге определяют показатель качества ЖЦ конструкции – долговечность.

### **5.1. Проектирование долговечности бетонных изделий для морозосолевого воздействия**

В условиях воздействия циклов замораживания и оттаивания при сильном насыщении минерализованной водой эксплуатируются бетон конструкций морских гидротехнических сооружений и зданий и сооружений, подверженных воздействию противогололедных материалов в зимний период.

Традиционно при проектировании долговечности бетонных конструкций для эксплуатации в морской воде в условиях замораживания-оттаивания применяется предписывающий подход, который основан на опыте эксплуатации существующих сооружений и большом объеме экспериментальных исследований бетона в условиях, приближенных к реальным. Нормативные документы для обеспечения долговечности предписывают алгоритм требований к составу и свойствам бетона в зависимости от степени агрессивности среды. Существующий подход к проектированию долговечности бетона для эксплуатации в агрессивных средах класса XF4 основан на положении, что установленные минимальные



требования к составу и свойствам бетона должны обеспечивать срок службы изделия не менее 50 лет. Требования к составу бетона и его прочности не зависят от климатического района строительства. Состав бетона по морозостойкости определяется методом подбора, поскольку отсутствуют расчетные методы.

Алгоритм предписывающего подхода к проектированию долговечности бетона в морской воде в условиях замораживания-оттаивания приведен на рис. 2.8. В соответствии с действующими нормативными документами [62, 67], которые гармонизированы с зарубежными, основными показателями долговечности бетона в агрессивных средах класса XF4 являются: водоцементное отношение (В/Ц), содержание цемента (Ц), воздухововлечение ( $V_{В.В}$ ). Анализ требований к показателям долговечности бетона ( $D_{БТ}$ ) при морозосолевом воздействии показывает, что в принципе они соответствуют требованиям по морозостойкости F:

– для обычного бетона:

$$F \rightarrow D_{БТ} \rightarrow f(V/Ц, Ц); \quad (5.1)$$

– для бетона с воздухововлекающими добавками:

$$F \rightarrow D_{БТ} \rightarrow f(V/Ц, Ц, V_{В.В}). \quad (5.2)$$

Наблюдаемые или подразумеваемые связи показателей В/Ц и Ц с морозостойкостью не носят явной закономерности, которая наблюдается для зависимости прочности при сжатии от отношения В/Ц. Этим можно объяснить факт, что даже члены европейского союза по стандартизации (СЕН) не имеют общего мнения по вопросу нормирования показателей Ц и В/Ц для расчета долговечности бетона в морской воде в условиях замораживания-оттаивания.

Анализ опыта строительства и эксплуатации морских портовых сооружений на Дальнем Востоке показывает, что минимальные требования к составу бетона, рекомендованные ГОСТ 31384: В35; В/Ц = 0,45; Ц = 340 кг/м<sup>3</sup>; воздухововлечение  $V_{В.В} = 4 \%$ , позволяют обеспечить расчетный срок службы не менее 50 лет. Однако это может быть обеспечено при условии

соблюдения нормальных условий твердения ( $T_{\text{УТ}}$ ) бетона в конструкции: влажность не менее 95 %; продолжительность твердения – 28 суток; температура твердения – +18 °С.

На основе этих данных можно определить условия обеспечения расчетного срока службы  $L_{\text{РС}}$  не менее нормируемого  $L_{\text{Н}} = 50$  лет:

$$L_{\text{РС}} = L_{\text{Н}} \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E, \quad (5.3)$$

где:  $A$  – фактор прочности (равен 1 при В35);  $B$  – фактор В/Ц (равен 1 при В/Ц = 0,45);  $C$  – фактор содержания цемента (равен 1 при Ц = 340 кг/м<sup>3</sup>);  $D$  – фактор воздухововлечения бетонной смеси (равен 1 при  $V_{\text{В.В}} = 4$  %);  $E$  – фактор режима твердения (равен 1 при условии: влажность не менее 95 %); продолжительность твердения – 28 суток; температура твердения 18 °С).

Реализация на строительной площадке условия (5.3) гарантирует срок службы бетона в зоне прилива не менее 50 лет. Проведенные исследования (глава 3) показывают, что для обеспечения долговечности бетона, подверженного длительному замораживанию, т.е. при механизме замораживания бетона в конструкции вида  $R_{\text{F2}}$ , необходимо ограничивать не только нижний предел по содержанию цемента, но и верхний. При этом особое внимание должно уделяться максимальному содержанию воды. Из опыта лабораторных исследований и технологии бетона, применяемой на строительстве морских сооружений, водосодержание бетонных смесей при всех ограничениях для выражения (5.3) должно быть на уровне 160-170 л/м<sup>3</sup>. В этом случае расчетный срок службы определяется по выражению:

$$L_{\text{РС}} = L_{\text{Н}} \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F, \quad (5.4)$$

где:  $F$  – фактор водосодержания (равен 1 при  $V = 160-175$  л/м<sup>3</sup>), остальные параметры по (5.3).

Выполненные экспериментальные исследования и известные из научных публикаций данные [100] показывают возможность существенно увеличить морозостойкости бетона за счет дополнительного воздухововлечения. В тоже время отсутствуют критерии оптимальности для обеспечения морозостойкости в реальных условиях эксплуатации.

Стремление постоянно увеличивать требования к бетону по прочности и морозостойкости для повышения долговечности не является рациональным вариантом. Это, как правило, ведет к увеличению расхода цемента, что увеличивает экономическую нагрузку на строительство и экологическую нагрузку на окружающую среду, исходя из технологии получения цемента.

С учетом климатических районов России, которые по характеру внешних воздействий отличаются принципиально, решить вопрос долговечности только за счет применения воздухововлекающих добавок не получается. Это подтверждают результаты проведенных исследований. Анализ научной литературы показывает, что вопрос о влиянии воздухововлекающих добавок на морозостойкость бетона хорошо исследован для нормальных условий твердения. Опыт строительства сооружений на Дальнем Востоке в морской воде в условиях замораживания-оттаивания показывает, что эффективность этих добавок в реальных условиях твердения бетона необходимо уточнять на основании целенаправленных исследований.

### **5.1.1. Критерии долговечности бетона в условиях многоциклического замораживания и оттаивания**

Анализ литературных данных и результаты исследований автора показывают, что в выражениях долговечности и морозостойкости (5.1) и (5.2) эффективность работы в бетоне показателей долговечности В/Ц и Ц определяется значением степени гидратации цемента ( $\alpha$ ), которая косвенно оценивается условиями твердения бетона. В соответствии с требованиями предписывающих документов образцы бетона должны испытываться в стандартных условиях, которые характеризуются следующими показателями: продолжительность твердения 28 суток, температура среды 18 °С и влажность не менее 95 %. Требования к показателям долговечности на этапе проектирования назначаются исходя из этих условий твердения бетона к началу морозного воздействия. Это позволяет оценивать сравнительную стойкость бетонов различных составов в стандартных условиях морозного

воздействия. Поэтому на этапе подборов состава бетона показатели долговечности  $V/C$ ,  $C$  и  $V_{в.в}$  назначаются из условия обеспечения требуемой прочности и морозостойкости при стандартных условиях твердения бетона, т.е. определяется закономерность  $R, F = f(V/C, C, V_{в.в})$  при постоянной степени гидратации цементного камня ( $\alpha = \text{const}$ ).

Прочность бетона используется в качестве показателя долговечности в отечественных и зарубежных нормативных документах, поскольку позволяет косвенно оценивать  $V/C$  отношение. Прочность бетона достаточно точно можно прогнозировать, используя широко известную зависимость прочности от водоцементного отношения:  $R = f(V/C)$ , а процедуры тестирования и оценки соответствия прочности надежны [108]. Имеются обширные данные испытаний, показывающие, что, хотя в целом существует определенная взаимосвязь между прочностью и свойствами, которые определяют долговечность, не существует уникальной, единственной количественной взаимосвязи между прочностью и долговечностью [109, 110]. Прочность на сжатие бетона связана с общей пористостью, а для морозостойкости важна структура и параметры пористости, поэтому все чаще ставится под сомнение обоснование прочности на сжатие как показателя долговечности. Синергетический характер взаимодействия между показателями долговечности является главной причиной отсутствия количественной связи, например, между прочностью и морозостойкостью. Наблюдаемый повсеместный износ и повреждение сооружений в течение последних нескольких десятилетий, эксплуатируемых в морской воде в условиях замораживания-оттаивания, связывают с тем, что долговечность стараются обеспечить за счет повышения прочности.

Морозостойкость бетона фактически является единственным показателем, характеризующим качество реализации проектного решения по долговечности в агрессивных средах класса XF4 на этапе строительства. Однако использовать его для управления технологией на этапе изготовления конструкций невозможно из-за сложности метода оценки этого показателя.

Результаты по морозостойкости, которые можно получить только после нескольких месяцев по окончании бетонных работ, практически нельзя применить для оценки соответствия. Поэтому на практике долговечность бетона и конструкции в реальных условиях проверяется по состоянию в гарантийный срок, который можно рассматривать в качестве периода «приработки» бетона к условиям эксплуатации.

Результаты исследований, приведенные в главе 3, показывают, что, например, предписывающие требования к морозостойкости бетона [67] на порядок выше необходимых для обеспечения срока службы 100 лет. Однако высокие показатели бетона по морозостойкости, полученные при подборе составов бетона, не являются гарантией обеспечения долговечности бетона.

На схеме рис. 5.1 показаны технологические пределы, на которых возникает риск несоответствий. Следует отметить, что определяющие показатели долговечности В/Ц и Ц, которые характеризуют качество системы капиллярных пор с точки зрения морозостойкости, на всех технологических этапах не контролируются по причине отсутствия прямых методов испытаний.

В результате, после этапа проектирования состава бетона отсутствует механизм для объективного контроля и оценки соответствия показателей долговечности. Потребитель бетонной смеси оценивает ее соответствие на принципах доверия производителю по документу о качестве.

Процедуры тестирования и оценки соответствия прочности и морозостойкости надежны, однако эффективность их как методов оперативного контроля очень низка из-за продолжительности испытаний: значение прочности устанавливается через 28 суток, а морозостойкости – в 60 суток и позже. Поэтому в условиях строительной площадки из показателей, определяющих долговечность, реально можно контролировать только воздухоудержание бетонной смеси ( $V_{в.в}$ ) до ее укладки в конструкцию.

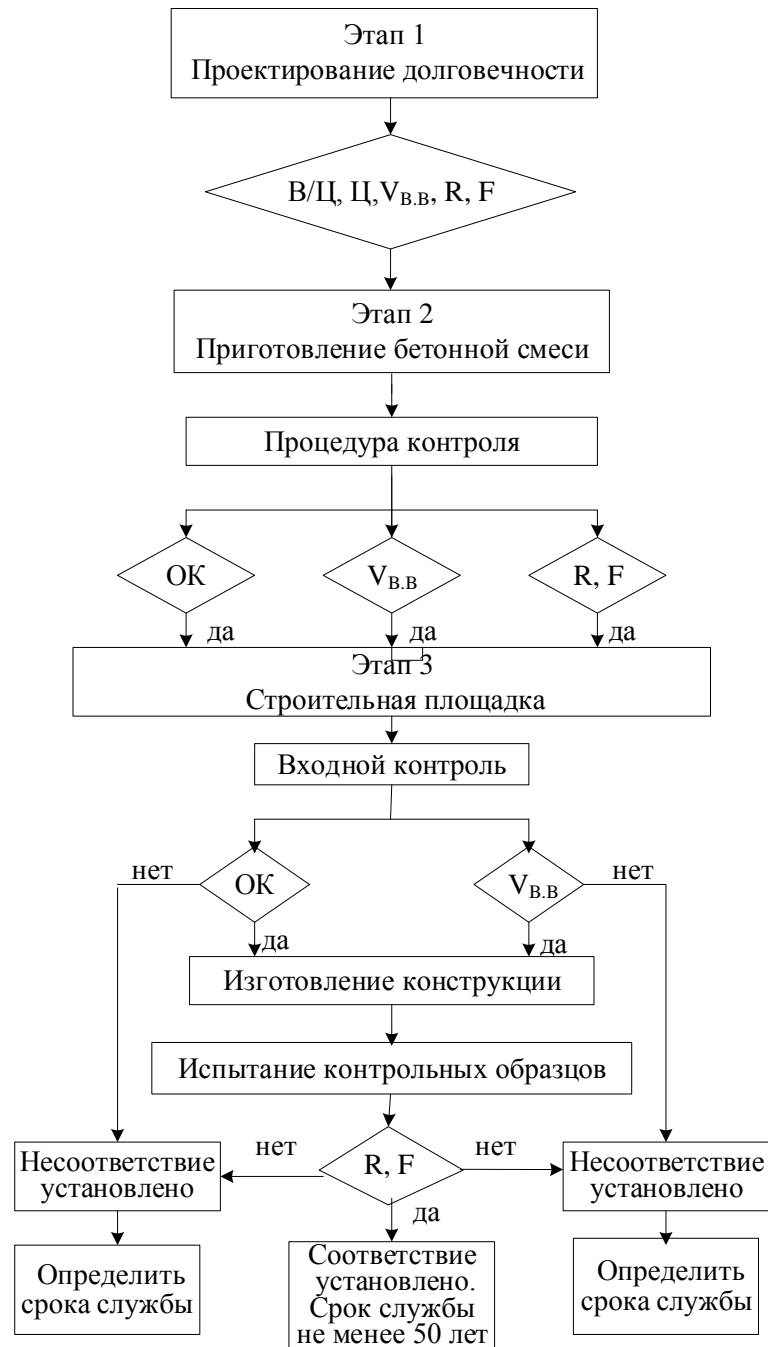


Рис. 5.1. Схема процедур определения показателей долговечности и оценки соответствия бетона в морской воде в условиях замораживания-оттаивания

На этапе проектирования важно установить реальные условия эксплуатации бетонных изделий и конструкций в сооружении, определить преобладающий механизм замораживания бетона, в соответствии с которым должны разрабатываться меры защиты бетона от коррозии в условиях морозного воздействия. В этом случае необходимо обосновать требуемую марку бетона по морозостойкости с учетом показателей состава бетона В/Ц, Ц и  $V_{В,В}$ , которые

являются критическими. Как отмечено выше, реализация этих показателей в бетоне с точки зрения долговечности зависит от условий твердения.

Анализ предписывающих требований к условиям твердения бетона показывает [15, 68, 111-113], что они в основном направлены на обеспечение прочностных показателей бетона, которые должны повышаться при твердении бетона. Поэтому в первую очередь рекомендуется при выдерживании уложенного бетона в начальный период его твердения поддерживать температурно-влажностный режим, обеспечивающий нарастание прочности [113]. Это требование логически обосновано тем, что при строительстве важно обеспечить механическую безопасность конструкции.

В настоящее время для обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций морских гидротехнических сооружений даны рекомендации (таблица 5.1) в отношении сроков выдерживания конструкций для зоны переменного уровня при положительных температурах до их замораживания с учетом технологии бетона, гидрометеорологических условий эксплуатации сооружения, вида конструкций [37, 63, 68].

Из таблицы видно, что для зоны переменного уровня рекомендуется выдерживать конструкции из обычного бетона при положительной температуре в пределах 45-60 суток.

Таблица 5.1

Минимальные сроки выдержки бетонных и железобетонных конструкций для зоны переменного уровня морских гидротехнических сооружений, эксплуатируемых в тяжелых гидрометеорологических условиях, сутки

Условия твердения							
непропаренные				пропаренные			
массивные		немассивные		массивные		немассивные	
без добавок	с ПАВ	без добавок	с ПАВ	без добавок	с ПАВ	без добавок	с ПАВ
60	45	45	28	60	45	28	15

Длительный опыт применения этих рекомендаций в морском гидротехническом строительстве на Дальнем Востоке, безусловно, представляет интерес для изучения как с практической точки зрения для

совершенствования технологии бетонных работ, так и в научном плане для проверки и развития гипотез о механизмах разрушения бетона в морской воде в условиях замораживания-оттаивания.

Результаты проведенных исследований показывают, что для конструкций, эксплуатируемых при морозосолевых воздействиях, технология бетонных работ должна строиться не на основе установления долговечности через прочность, а на основе установления прочности через долговечность, поскольку при обеспечении долговечности реализуется постоянный рост прочности за счет процесса гидратации.

Все основные показатели долговечности –  $V/C$ ,  $C$ ,  $V_{в.в.}$ , реализуются только при определенных показателях степени гидратации цементного камня. Реальная технология бетона на строительной площадке не всегда способна обеспечить установленные требования по долговечности. Это показано на примере строительства гидротехнического сооружения КЗ-1 на заводе СПГ (п. Пригородное, о. Сахалин) [14]. Наблюдаемые случаи преждевременного разрушения бетона в основном связаны с нарушением условий твердения бетона в ранний период. В результате формируется структура пор бетона с параметрами, которые не способны обеспечить стойкость бетона к морозному воздействию при сильном насыщении.

Современные теоретические положения структурной теории цементных бетонов и общепринятые гипотезы о механизмах разрушения бетона при морозном воздействии дают основания считать, что при оценке морозостойкости бетона целесообразно использовать такие показатели, как зрелость структуры бетона ( $S_f$ ) и критическая зрелость структуры бетона ( $S_a$ ). Последний показатель, т.е. ( $S_a$ ), характеризует условия, при которых формируется дискретная система капиллярных пор. Например, А.М. Невилль [45] прочность бетона связывает со зрелостью бетона, которая измеряется в градусо-сутках. Если это принять за основу, то зрелость структуры бетона  $S_f$  будет зависеть от фактических значений условий твердения бетона:



$$S_f = f(T_f; t_f; P_f), \quad (5.5)$$

где:  $T_f$  – период твердения бетона до морозного воздействия, сутки;  $t_f$  – среднее значение температуры твердения за период  $T_f$ , °С;  $P_f$  – влажность среды в период твердения бетона  $T_f$ , %.

Выполненные исследования показали (глава 3), что суровость морозного воздействия при оценке морозостойкости по стандартной методике может быть на порядок выше реальной суровости. Поэтому важно установить граничные показатели структуры пор, которые позволяют обеспечить требуемую долговечность с учетом технологии бетонных работ на строительной площадке и реальных условий эксплуатации бетона в конструкции.

Установлено, что большие запасы по морозостойкости при проектировании составов бетона не являются гарантией долговечности бетона в конструкции, если проектирование и строительство осуществляется без учета преобладающего механизма замораживания и условий строительной площадки. В одинаковых условиях эксплуатации бетон, изготовленный по традиционной технологии, может иметь «вечный» срок службы, а бетон, изготовленный по современной технологии, т.е. с применением добавок ПАВ, может разрушаться после одного длительного замораживания. Это подтверждает положение, что долговечность бетона определяется не только усталостными процессами. Есть все основания считать, что значимое место занимают процессы влагопереноса в структуре бетона в начальный период эксплуатации.

Существующий подход к проектированию долговечности на основании предписывающего принципа имеет ограниченную область применения, поскольку направлен на обеспечение долговечности в условиях, когда механизм разрушения бетона обусловлен циклами попеременного замораживания и оттаивания. Результаты исследований дают основания считать, что для долговечности бетона в реальных условиях принципиальным вопросом является ограничения как по содержанию цемента (Ц), так и по содержанию воды (В) в бетонной смеси. Содержание

воды в бетонной смеси (В), безусловно, следует относить к важным показателям, поскольку во многом определяет технологию бетонных работ на объекте. Например, при длительном замораживании бетона влагосодержание может влиять на процессы влагообмена в структуре бетона при градиенте температур в слоях конструкции и создавать в локальных зонах поверхностного слоя критическое водонасыщение. При механизме замораживания бетона вида  $R_{F2}$  это может являться определяющим фактором для разрушения бетона в начальный период эксплуатации конструкций.

Результаты проведенных исследований дают основания считать, что при механизме замораживания бетона, в котором преобладающими факторами являются температура ( $t_F$ ) и длительность ( $T_F$ ) замораживания бетона, механизм разрушения бетона обусловлен процессами влагопереноса внутри поровой структуры. Поэтому требования к технологии бетона для обеспечения долговечности должны учитывать высокую вероятность разрушения бетона на раннем этапе эксплуатации конструкций в условиях длительного обледенения, поскольку принципиально изменяется механизм водонасыщения бетона при замораживании. Формирование структуры бетона в условиях длительного замораживания, исходя из теории структурообразования и гипотез механизмов разрушения бетона при воздействии мороза, связаны с процессами тепло- и влагообмена. За счет этих процессов возможно перераспределение влаги и насыщение пор бетона на границе промерзания до критической степени. Данный процесс не моделируется стандартными испытаниями, т.к. образцы представляют замкнутую систему, в которой практически исключаются процессы тепло- и влагообмена, характерные для массивных конструкций. Есть основания полагать, что разрушение бетона в конструкциях портовых сооружений КЗ-1 и КЗ-2 на участках обледенения обусловлено этими процессами. Поэтому на этапе проектирования при назначении мер первичной защиты бетона должны устанавливаться требования к технологии этой защиты.

Традиционные подходы к исследованию стойкости бетона от циклов ЗО не позволяют объективно оценить роль водосодержания бетонной смеси при механизме замораживания бетона в конструкции вида  $R_{F2}$  к началу морозного воздействия. Результаты исследований показывают, что существует «критический» расход воды в бетоне, после которого происходит резкое снижение морозостойкости. Считают [34], что этот показатель является более важным для морозостойкости, чем В/Ц отношение.

Результаты, полученные при анализе причин разрушения бетона в ранние сроки эксплуатации (глава 3), например, лавинообразное разрушение, которое классифицировано как внезапный отказ, можно рассматривать в качестве подтверждения этого положения. Поэтому при проектировании конструкций для эксплуатации в морской воде в условиях замораживания-оттаивания должны быть указаны рекомендации по выбору технологии бетонных работ с учетом механизма замораживания бетона, поскольку это является одной из мер защиты бетона от морозной коррозии.

С учетом рассмотренных выше положений, алгоритм процедуры проектирования бетона по долговечности (рис. 5.1) целесообразно дополнить рекомендациями по ограничению содержания воды в бетонной смеси и оценке соответствия по критической зрелости структуры бетона (рис. 5.2).

Коэффициент зрелости структуры ( $N_F$ ) позволяет объективно, а не субъективно, проводить оценку соответствия на этапе приемки конструкций, поскольку показатели  $T_f$  и  $t_f$ , характеризующие зрелость структуры  $S_f$  можно инструментально с помощью простых технических средств измерения определить в условиях строительной площадки. Однако это должно рассматриваться при проектировании в качестве обязательного метода оценки соответствия на этапе приемки конструкций в эксплуатацию.

Пример эксплуатации конструкций причального сооружения К1 показывает, что в зоне прилива даже при оттаивании в морской воде, температура которой в зимний период находится в пределах от  $+1$  °С до  $-2$  °С, условия являются благоприятными для последующей гидратации цемента

в бетоне с В/Ц ~ 0,50. Ранее отмечено, что замораживание бетона на воздухе может осушать поры в поверхностном слое бетона, т.е. приводить к снижению водонасыщения пор.

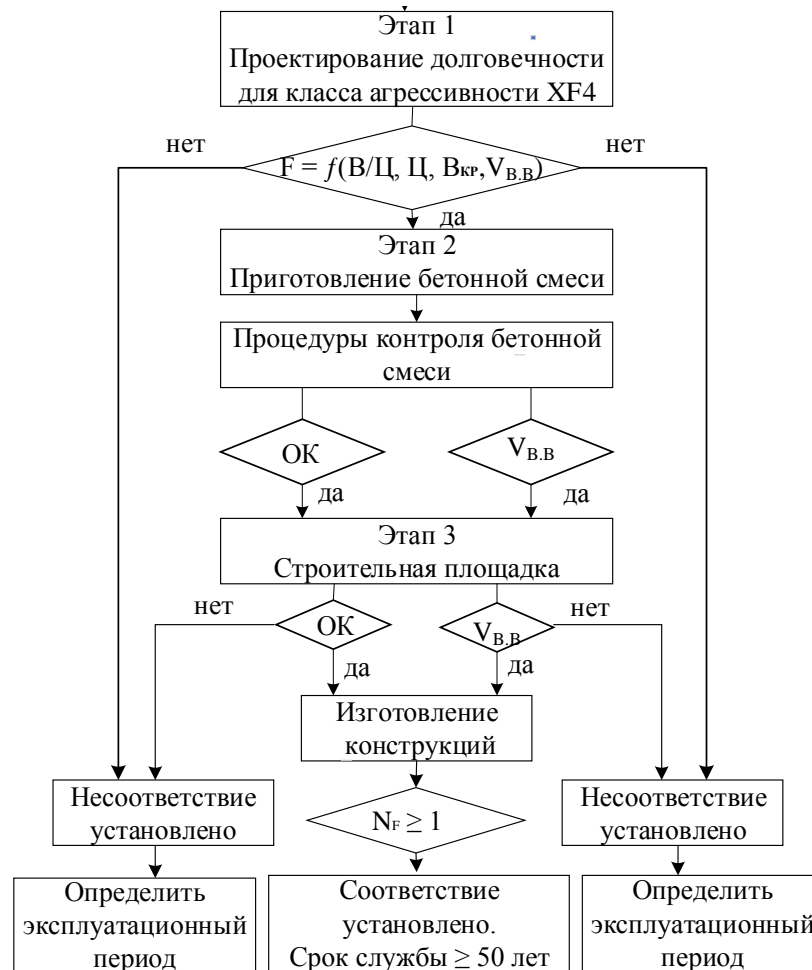


Рис. 5.2. Блок-схема алгоритма проектирования долговечности бетона для эксплуатации в условиях морозной нагрузки вида  $P_{F2}$  и контроля показателей долговечности на этапе строительства

### 5.1.2. Критерии долговечности бетона при длительном замораживании

В условиях обледенения, т.е. при механизме замораживания бетона вида  $P_{F2} = f(t_F, T_F)$ , в поверхностном слое бетона сохраняется высокий уровень водонасыщения пор. Поэтому разрушение бетона может происходить как в поверхностном слое бетона при сообщающейся системе капиллярных пор, так и в глубинных слоях при наличии свободной воды, способной к миграции при температурном градиенте. В связи с этим для бетона конструкций, подверженных длительному обледенению, к началу

морозного воздействия, во-первых, необходимо обеспечить критическую зрелость структуры бетона и, во-вторых, создать условия, которые позволят связать за счет процесса гидратации цемента свободную воду, способную к влагопереносу в структуре пор.

Длительное обледенение бетона, которое может составлять 60 суток и более, приводит к закупорке пор в поверхностном слое. В результате в поверхностном слое происходит разрушение бетона, которое имеет лавинный характер. При механизмах замораживания вида  $R_{F1}$  и  $R_{F2}$  необходимо использовать технологические приемы, позволяющие интенсифицировать процессы гидратации цемента. Однако не исключено, что время, необходимое для формирования дискретной системы капиллярных пор, т.е. время для формирования критической зрелости структуры, будет недостаточным для связывания свободной воды, которая может создать условия для критического водонасыщения пор на локальных участках за счет влагопереноса.

Поскольку в настоящее время раннее разрушение бетона в конструкциях является характерным видом повреждения, целесообразно совершенствовать технологию бетонных работ и методов оценки соответствия на основе следующих положений:

- к существующим ограничениям, принятым для проектирования долговечности бетона, принять ограничение по максимальному содержанию воды в бетонной смеси;

- на этапе строительства в обязательном порядке делать оценку соответствия проектных требований по долговечности с использованием показателя, характеризующего структурную зрелость бетона к началу морозного воздействия.

## 5.2. Реализация проектных решений по долговечности бетона на этапе строительства

На этапе строительства основная задача заключается в реализации проектных требований по защите от коррозии при морозном воздействии, которые рекомендуются назначать по СП 28.13330 [67] и ГОСТ 31384 [62]. Реализация этих требований на этапе строительства дает основания прогнозировать, что в этом случае срок службы бетона в конструкции будет не менее 50 лет. В агрессивной среде класса XF4 срок службы должен обеспечиваться за счет мероприятий первичной защиты, т.е. за счет определяющего свойства бетона – морозостойкости.

Анализ алгоритмов проектирования долговечности бетона и контроля качества (рис. 5.1 и рис. 5.2) показывает, что реально в условиях строительной площадки можно контролировать только воздухосодержание бетонной смеси ( $V_{в.в}$ ) до ее укладки в конструкцию. Результаты исследований показывают (рис. 3.21), что из шести нормируемых показателей качества [62], морозостойкость может существенно снижаться при несоответствии лишь по одному показателю – воздухововлечению.

В условиях строительной площадки нередко возникают вопросы по обеспечению нормативных требований по воздухосодержанию бетонной смеси. Как уже отмечалось, основная проблема заключается в том, что вовлеченный воздух не дозируется непосредственно в бетонную смесь как остальные составляющие, а является производной от многих факторов, которые в условиях строительной площадки трудно учитывать. Многофакторность зависимости морозостойкости не позволяет установить четкой количественной связи между морозостойкостью и воздухововлечением, поскольку эффект повышения морозостойкости также зависит от других факторов: В/Ц, минералогического состава цемента, качественных показателей мелкого и крупного заполнителей и др., которые влияют на формирование параметров порового пространства.

Морозостойкость бетона в основном зависит от обеспеченности нижнего предела искусственного воздухововлечения. Оптимальное значение содержания воздуха определяют в 4 %, но минимальное значение, которое обеспечивает морозостойкость, может быть 1,5-2,0 % [10, 17, 37, 45].

Экспериментальные работы с участием автора показали, что в реальных условиях обеспечение нормируемых показателей бетонной смеси является сложной и трудоемкой задачей на этапе подготовки к проведению бетонных работ.

На строительной площадке ситуация может развиваться по двум сценариям. Первый сценарий, когда показатели качества бетонной смеси в момент укладки в конструкцию не соответствуют заявленным требованиям. В частности, если номинальное значение воздухововлечения не обеспечено, следует предполагать, что не будут обеспечены и требования по морозостойкости бетона. В дальнейшем это может негативно отразиться на долговечности и сроках службы конструкции. Второй сценарий развивается, когда смесь при несоответствии качественных показателей не допускается к укладке в конструкцию, т.е. смесь бракуется. В этом случае у поставщика продукции возникает проблема с реализацией или утилизацией некачественной продукции. Этот сценарий, как правило, в отечественной практике рассматривается очень редко, но опыт строительства объектов на нефтегазовых шельфовых проектах Сахалина показал, что это вполне реальный случай.

В связи с этим была проведена работа по отработке технологии, позволяющей обеспечивать требуемые показатели качества бетонной смеси при длительной транспортировке бетонной смеси [114]. Производственная база по выпуску бетонной смеси (г. Южно-Сахалинск) располагалась на расстоянии более 50 км от строительного объекта (г. Корсаков, завод СПГ).

Бетонные работы выполняли в период с 10 сентября по 21 ноября 2018 г. Основной объем бетона уложен в период с 10.09 по 21.10 при температуре воздуха +17-23 °С. Время доставки бетонной смеси было в пределах 100-150

мин. Для контроля качества бетонных работ подрядчик привлек специалистов испытательного центра ООО «Трансстрой-Тест». Заказчик в договоре на поставку бетонной смеси заданного качества установил требования к воздухововлечению  $4 \pm 1$  % абс. и подвижности ПЗ (ОК 10-15 см). Входной контроль на объекте предусматривал приемку каждого автобетоносмесителя.

Проектные требования к бетонной смеси: БСТ В35 ПЗ F<sub>200</sub> W6 ГОСТ 7473-2010. Номинальный состав бетона по результатам лабораторного подбора был принят следующий:

- цемент (Спасский, ПЦ-500 Д0-Н) – 500 кг/м<sup>3</sup>;
- песок (кварцевый, Мкр 2,5) – 710 кг/м<sup>3</sup>;
- щебень (амфиболит, фракция 5-20 мм, Мдр-1200) – 1140 кг/м<sup>3</sup>;
- добавки: ПФМ-НЛК (ТУ 5745-022-58042865-2007) – 0,5 % сухого вещества от массы цемента;
- СНВ (ТУ 14-00281074-75-98) – 0,01 % сухого вещества от массы цемента.

Водоцементное отношение (В/Ц) составляло 0,35.

Добавка ПФМК-НЛК – полифункциональный модификатор бетона, относится к классу сильно пластифицирующих добавок, повышающих показатели долговечности бетона – морозостойкость, водонепроницаемость и коррозионную стойкость. Одним из физико-химических показателей добавки является повышение воздухововлечения.

Добавка СНВ (смола нейтрализованная воздухововлекающая) относится к воздухововлекающим добавкам. Высокая эффективность действия добавки СНВ проявляется при использовании в комплексе с пластифицирующими и суперпластифицирующими добавками [4, 96].

Показатели качества бетонной смеси и бетона определяли стандартными методами [84, 115].

Предварительные опытные испытания в реальных условиях показали, что максимальное воздухововлечение с добавкой (ПФМ-НЛК) составляет 4 % и может снижаться до 2 % при транспортировании бетонной смеси в



течение 60 минут. Транспортировка в течение 120 минут вызывала снижение воздухововлечения на 2-3 % абс., и на месте укладки значение могло быть в пределах 1,5-2,5 %, что не соответствовало требованиям заказчика.

С целью обеспечения требуемого воздухововлечения специалисты ООО «Трансстрой-Тест» предложили применить комплексную добавку СНВ + (ПФМ-НЛК), что позволило за счет дозирования добавки СНВ получать необходимое воздухововлечение на выходе из бетоносмесителя. Опыт показал, что регулировать воздухововлечение добавкой (ПФМ-НЛК) за счет дозирования и увеличения продолжительности перемешивания не эффективно, поскольку отсутствует тесная корреляционная связь между воздухововлечением (ВВ) и продолжительностью перемешивания.

На объекте и на бетоносмесительном узле (БСУ) было проведено по 40 контрольных испытаний, что позволило объективно оценить качественные показатели бетона и бетонной смеси.

Испытания проводились параллельно на заводе и строительной площадке. Результаты испытаний бетонной смеси и бетона, приведенные в таблице 5.2, показывают, что при транспортировании бетонной смеси в течение 100-150 минут подвижность бетонной смеси по ОК снижается с 23 до 9 см. При этом существенно понижается стабильность подвижности.

Таблица 5.2

Сравнительные показатели качества бетонной смеси и бетона на БСУ и объекте

Статистические показатели	Технологические показатели бетонной смеси				Прочность при сжатии бетона, МПа	
	БСУ		Объект		БСУ	Объект
	ОК, см	ВВ, %	ОК, см	ВВ, %		
Среднее значение	22,8	6,1	8,7	4,2	42,7	42,1
Коэффициент вариации	5,4	9,2	17,0	16,9	12,7	15,4

Примечание: прочность бетона определена на образцах, твердевших в нормальных условиях.

В связи с этим было принято решение применять двухэтапное дозирование добавки ПФМ-НЛК. Основная часть добавки СНВ+(ПФМ-НЛК) вводилась в процессе приготовления бетонной смеси на БСУ, а часть добавки (ПФМ-НЛК) вводилась на объекте после проверки подвижности и содержания воздуха. После введения добавки бетонная смесь перемешивалась в автобетоносмесителе в течение 5 минут, а затем повторно проводилась проверка воздухововлечения и подвижности. Это позволило обеспечить требуемую марку подвижности ПЗ – среднее значение подвижности смеси поднялось с 9 до 11 см, и повысить однородность подвижности – коэффициент вариации снизился с 17 до 14 %. Фактически осуществлялось ручное регулирование технологического процесса. Однако это позволило на 100 % обеспечить требуемую марку подвижности ПЗ.

Воздухововлечение бетонной смеси за период перевозки изменялось незначительно и соответствовало требуемым параметрам. Минимальное требуемое значение искусственного воздуха 3 % на объекте обеспечивалось на 100 % при среднем значении 4,2 % и коэффициенте вариации 16,9 %. Стабильность воздухововлечения смеси на БСУ завода более высокая: коэффициент вариации составил 9,2 % против 16,9 % на объекте. Испытания бетонной смеси показали, что применение комплексной добавки СНВ+(ПФМ-НЛК) позволяет надежно обеспечить минимальное содержание воздуха 3 %.

Более высокая неоднородность прочности бетона наблюдалась на объекте – при равной средней прочности бетона на объекте отмечена более высокая неоднородность прочности. Класс В35 при коэффициенте вариации 15,4 % и средней прочности 42,1 МПа обеспечен лишь на 86 %. Следовательно, у заказчика возникает вопрос о соответствии бетона требуемым показателям качества. Как видно, подрядчику приходится решать много вопросов по оценке качественных показателей и оценке соответствия бетонной смеси и бетона. Поэтому для производства важно иметь обоснованную информацию о влиянии воздухововлечения на долговечность

бетона в конструкциях, поскольку по этому показателю косвенно оценивается морозостойкость бетона и может приниматься решение о несоответствии.

Результаты проведенной работы показывают, что при значительной удаленности объекта от производственных баз обеспечить технологические показатели бетонной смеси можно при высоком уровне лабораторного и строительного контроля. Практика показывает, что применение комплексной добавки СНВ+(ПФМ-НЛК) позволяет надежно обеспечивать требования по  $V_{В.В}$ . Несмотря на технологичность применения полифункциональных добавок, надежное регулирование  $V_{В.В}$  и обеспечение нормативных требований за счет применения комплексных добавок ПАВ, отсутствие практических расчетных методов, основанных на зависимости морозостойкости бетона от воздухововлечения, не позволяют принимать оптимальные экономические решения по составам и технологии бетона. Это предопределяет необходимость дальнейшего изучения стойкости бетона от морозных воздействий с воздухововлекающими добавками с учетом опыта строительства и эксплуатации сооружений в конкретных природно-климатических условиях.

Исследования морозостойкости бетона, выполненные для оптимизации режимов технологии бетона для конкретного объекта (рис. 3.22), позволили установить возможность получения нормируемой морозостойкости  $F_{200}$  при различном содержании воздуха в бетоне. Оптимальным вариантом для производства, безусловно, является вариант применения бетонной смеси с минимальным содержанием воздуха, поскольку это связано с прочностными показателями бетона. Сочетание воздухововлекающих гидрофобизирующих ПАВ типа СНВ с пластифицирующими гидрофилизующими добавками типа СДБ обеспечивает стабильное требуемое воздухововлечение. Однако нормируемую морозостойкость  $F_{200}$  можно обеспечить за счет применения одной добавки ПФМ-НЛК и при воздухововлечении бетонной смеси менее 2 %, что меньше нормируемой.

Проведенные исследования показывают, что оптимизация технологии бетона должна строиться на основе учета условий производства бетонных работ на строительной площадке и реальной работы конструкций в сооружении с учетом механизма замораживания бетона.

Исследования бетонов при стандартной методике испытания дают возможность получить сравнительную стойкость бетона в условиях, для которых характерны многоцикличность переходов температуры через 0 °С и кратковременность периода цикла замораживания-оттаивания. Исследования морозостойкости по стандартной методике дают возможность косвенно судить о кинетике водонасыщения бетона при этом механизме замораживания бетона. В нашем случае мы имеем подтверждение того, что в этих условиях бетон с воздухововлекающими добавками имеет более высокую морозостойкость. Однако количественно невозможно оценить влияние объема воздухововлечения на долговечность бетона в реальных условиях.

На рис. 5.3 представлена схема оценки соответствия на строительной площадке по требованиям нормативных документов [112], которая является развитием схемы контроля показателей, характеризующих долговечность бетона, представленной на рис. 5.1.

Следует отметить, что в соответствии с требованиями [30] продолжительность твердения бетона по стандартному режиму должна быть не менее 28 суток. В условиях строительной площадки это обеспечить не всегда удается, поэтому при несоответствии возникает вопрос о прогнозируемом сроке службы при фактических условиях твердения или дополнительных мерах защиты конструкции для обеспечения срока службы 50 лет и более.

Как упоминалось ранее, условия твердения для обеспечения долговечности при морозном воздействии целесообразно оценивать показателем структурной зрелости бетона  $S_f$ . Есть все основания считать, что показатель структурной зрелости  $S_f$  можно использовать для оценки соответствия на этапе приемки конструкций, поскольку показатели, косвенно

характеризующие  $S_f$ , можно инструментально определить в условиях строительной площадки с помощью технически простых средств измерения.

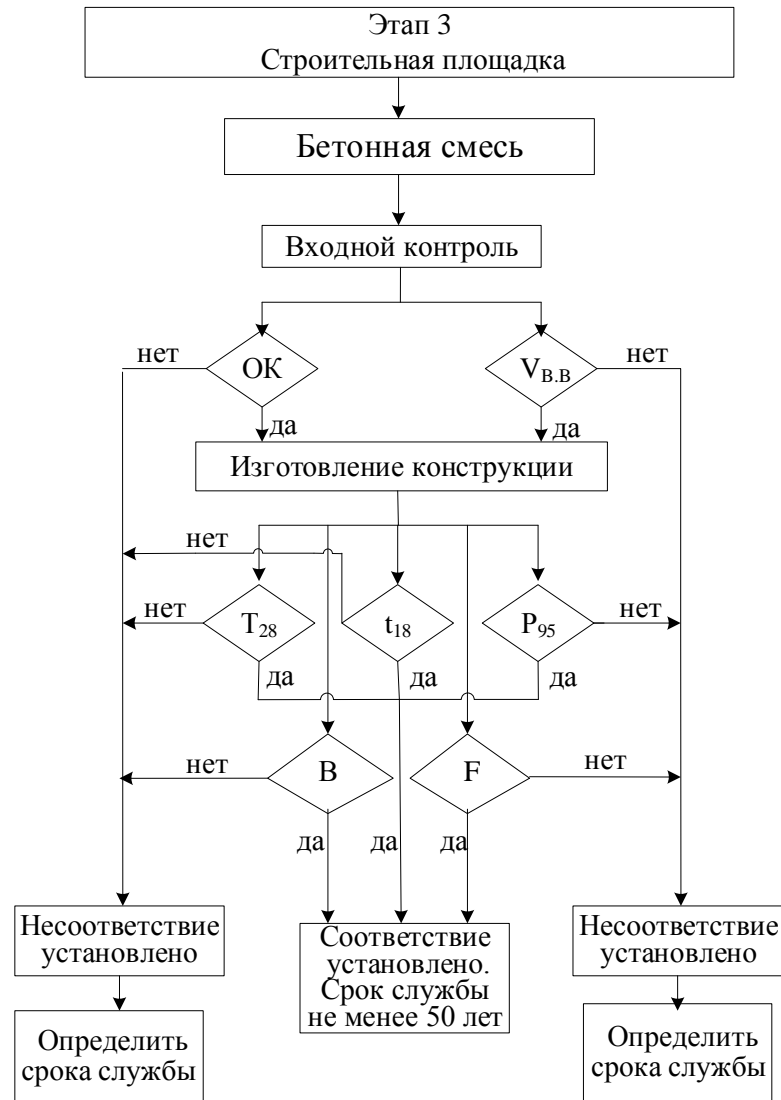


Рис. 5.3. Схема контролируемых параметров долговечности бетона на этапе изготовления конструкции в соответствии с действующими нормами [112]

Коэффициент зрелости структуры бетона  $N_F$  позволяет характеризовать вид системы капиллярных пор и уровень ее зрелости относительно нормальных условий твердения:

$$N_F = S_f/S_a. \quad (5.6)$$

На рис. 5.4 представлена схема для оценки соответствия на этапе приемки конструкции в эксплуатацию.

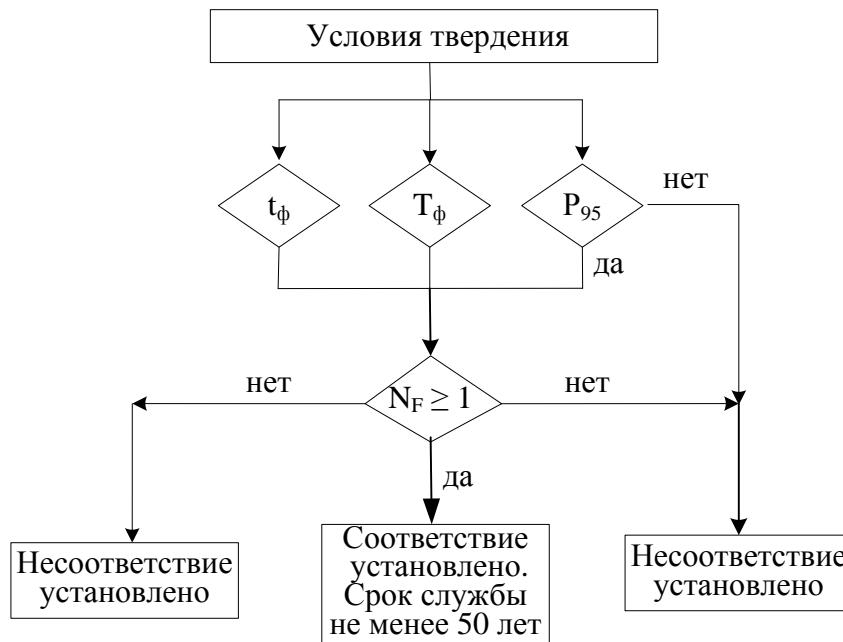


Рис. 5.4. Схема для оценки соответствия условий твердения бетона коэффициентом зрелости структуры бетона ( $N_F$ )

Показатель  $S_f$  является интегральной характеристикой фактических условий твердения бетона, по которому можно делать оценку соответствия. В качестве критической (эталонной) зрелости структуры ( $S_a$ ) предложено рассматривать период для формирования дискретной капиллярной пористости при нормальных условиях твердения, поскольку накоплен большой опыт оценки морозостойкости по стандартной методике.

Исходя из этого, косвенными параметрами критической зрелости структуры бетона являются основные параметры режима твердения в соответствии с действующими нормативными документами: температура среды  $+18\text{ }^\circ\text{C}$  ( $t_{18}$ ) и влажность среды не менее 95 % ( $P_{95}$ ), т.е.  $S_a = f(T_{28}; t_{18}; P_{95})$ . Критическая зрелость структуры бетона – это одно из необходимых условий долговечности конструкций в эксплуатационный период, поэтому уровень фактической зрелости ( $S_f$ ) не должен быть меньше критической зрелости структуры ( $S_a$ ).

В таблице 5.3 приведены результаты экспериментальных исследований в зависимости от значений изучаемых параметров.

Таблица 5.3

Д <sub>БТ</sub> , ГОДЫ	В/Ц	Ц, кг/м <sup>3</sup>	В <sub>кр</sub> , л/м <sup>3</sup>	Т <sub>ут</sub> , СУТКИ	V <sub>ВВ</sub> , %
50	0,4	438	175	3	4,0
47	0,5	350	175	14	4,0
45	0,6	292	175	180	4,0

Примечания: Д<sub>БТ</sub> – срок службы бетона, годы; В/Ц – водоцементное отношение, безразмерная величина; В<sub>кр</sub> – критическое водосодержание бетонной смеси, л/м<sup>3</sup>; Т<sub>ут</sub> – продолжительность твердения при температуре 18 °С и влажности не менее 95 %; V<sub>ВВ</sub> – воздуходоержание бетонной смеси, %.

Поскольку в данном случае величины В<sub>кр</sub> и V<sub>ВВ</sub> не менялись, математической обработке подверглись только оставшиеся величины. В результате получено следующее выражение:

$$D_{BT} = 14,8(V/C)^{0,33}(C)^{0,26}(T_{ут})^{-0,045} \quad (5.7)$$

В таблице 5.4 по данным [45] представлены параметры для формирования критической зрелости бетона S<sub>a</sub> при твердении в обозначенных условиях. Значение критической зрелости S<sub>a</sub> рассчитано по выражению (5.8), где n<sub>p</sub> = 1, поскольку условно принято, что влажность при нормальных условиях твердения P<sub>f</sub> ≥ 95 %.

$$S_F = \frac{T_f \cdot t_f}{n_p}, \quad (5.8)$$

где: n<sub>p</sub> – коэффициент, характеризующий значимость влажности для формирования структуры пор.

Таблица 5.4

Параметры критической зрелости структуры бетона по данным [45] и коэффициент зрелости структуры бетона в 28 суток в нормальных условиях твердения

В/Ц	Время твердения T <sub>f</sub> для формирования дискретной системы пор, сутки	Критическая зрелость структуры S <sub>a</sub> , °С×сутки	Коэффициент зрелости структуры бетона, N <sub>28</sub> = S <sub>28</sub> /S <sub>a</sub>
0,40	3	54	9,3
0,45	7	126	4,0
0,50	14	252	2,0
0,60	180	3240	0,2
0,70	360	6480	0,1

На основании данных, приведенных в таблице 5.4, построены графики (рис. 5.5), которые показывают влияние В/Ц на уровень структурной зрелости бетона в 28 суток ( $S_{28}$ ) относительно критической зрелости ( $S_a$ ) (кривая 1); период достижения критической зрелости бетона в условиях нормального твердения (кривая 2), который принят в дальнейших рассуждениях как «критический возраст» бетона ( $T_{кр}$ ).

Уровень зрелости структуры бетона влияет на развитие процессов коррозии на стадии инициации и деградации. В процессе твердения бетона, из двух выделенных параметров режима твердения ( $t_{18}$ ) и ( $P_{95}$ ) любой может иметь определенное несоответствие.

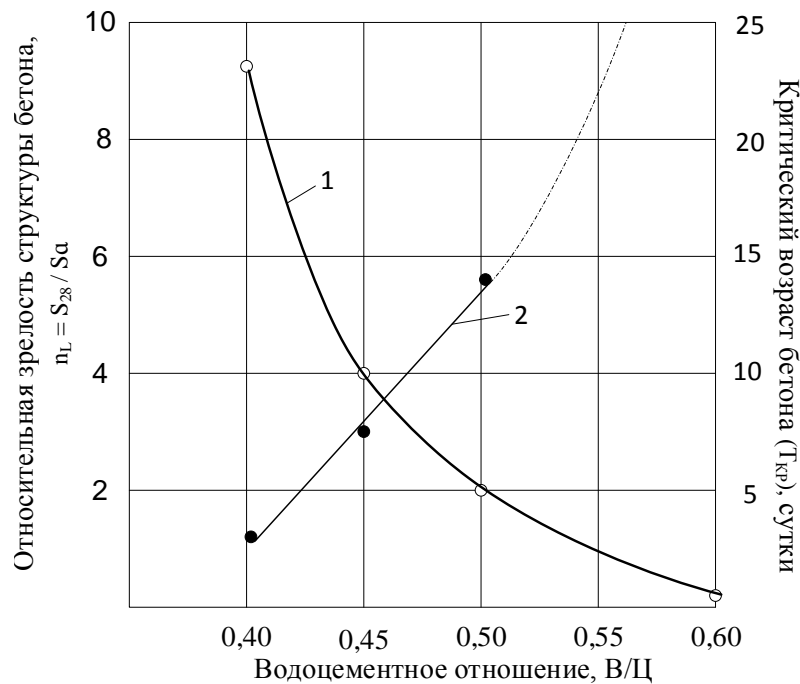


Рис. 5.5. Зависимость относительной структурной зрелости бетона  $n_L$ (1) и критического возраста  $T_{кр}$  (2) при нормальном режиме твердения от В/Ц отношения

Показатель фактической зрелости структуры  $S_f$  можно определить в условиях строительной площадки при гарантии влажного твердения бетона в течение критического возраста ( $T_{кр}$ ) по методике, изложенной выше. Отсутствие влажных условий выдерживания бетона в критический возраст следует считать условием несоответствия бетона проектным требованиям по долговечности. Определив критический уровень зрелости для принятого



состава бетона, можно с учетом погодных условий строительной площадки определить требуемый срок твердения ( $T_{TP}$ ) бетона, необходимый к началу морозного воздействия, или технологические приемы, позволяющие сократить этот срок.

На рис. 5.5 кривая 2 характеризует зависимость критического возраста ( $T_{KP}$ ) от В/Ц отношения. Например, по результатам проведенных исследований (глава 3) установлено, что бетоны с В/Ц отношением на уровне 0,5 могут обеспечить «вечный» срок службы конструкциям морских сооружений. Поэтому, исходя из данных таблицы 5.4, значение критической зрелости структуры бетона  $S_a = 252$  градусо-суток при нормальных условиях твердения будет обеспечено в течение 14 суток. Если температурный режим будет отличный от нормального ( $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), необходимо откорректировать продолжительность влажностного твердения до требуемой продолжительности ( $T_{TP}$ ) с учетом прогноза погодных условий строительной площадки, используя расчетную формулу (5.9):

$$T_{TP} = S_a / t_f, \quad (5.9)$$

где:  $S_a$  – значение критической зрелости структуры бетона по таблице 5.4;  $t_f$  – среднесуточная температура твердения бетона.

Например, при средней температуре  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$  с учетом корректировки продолжительность влажностного выдерживания до замораживания должна уже составлять не 14, а 36 суток. Результаты, полученные на основании натуральных и экспериментальных исследований, показывают, что данная концепция в наибольшей степени применима для получения долговечного бетона при механизме замораживания вида  $R_{F1}$ . Это позволяет обоснованно для практического применения разрабатывать виды и продолжительность последующего ухода с учетом состава бетонной смеси, технологии бетонирования, вида конструкции и погодных условий.

Для получения на строительной площадке бетонов со сроком службы более 100 лет необходимо создать условия, позволяющие формировать на начальном этапе твердения бетона параметры поровой структуры, которая

способна выдерживать максимальное морозное воздействие в первый зимний сезон. Поэтому требования к показателям долговечности необходимо назначать с учетом преобладающего вида механизма замораживания бетона.

Долговечность бетона при механизме замораживания вида  $R_{F1}$  будет обеспечена при условии, когда степень насыщения активных пор в первый зимний сезон не будет критической. Результаты проведенных исследований показывают, что бетон конструкций в зоне прилива будет соответствовать условиям долговечности, если на строительной площадке будут реализованы условия (5.3) и (5.4).

Эффективность технических решений на этапе строительства и эксплуатации сооружения в первую очередь определяется обоснованностью проектных решений и надежностью их реализации на этапе строительства. Поэтому приемку конструкции в эксплуатацию целесообразно проводить на основании комплексной экспертной оценки нормативной, проектной и исполнительной документации. Целью экспертизы является установление соответствия мер защиты от коррозии бетонных конструкций, принятых на этапах проектирования и строительства, требованиям долговечности для эксплуатации в агрессивной среде класса XF4 и прогноза долговечности с учетом реальных условий эксплуатации бетона в сооружении.

Схема алгоритма принятия решения при оценке соответствия бетонных конструкций требованиям долговечности в агрессивных условиях класса XF4 представлена на рис. 5.6.

Долговечность бетона следует привязывать к условиям эксплуатации, поскольку критическая степень насыщения бетона  $S_{CR}$  зависит от сочетания показателей  $S_{ACT}$  и  $R_F$ . Принимая во внимания, существующие недостатки в оценке соответствия на этапе приемки конструкций в эксплуатацию, предложен метод оценки соответствия на основании экспертизы нормативно-технической, проектной и исполнительной документации для конструкций в агрессивной среде класса XF4. С учетом этой методики разработаны

стандарты предприятия в ООО «Трансстрой-Тест», которые используются для экспертной оценки соответствия.

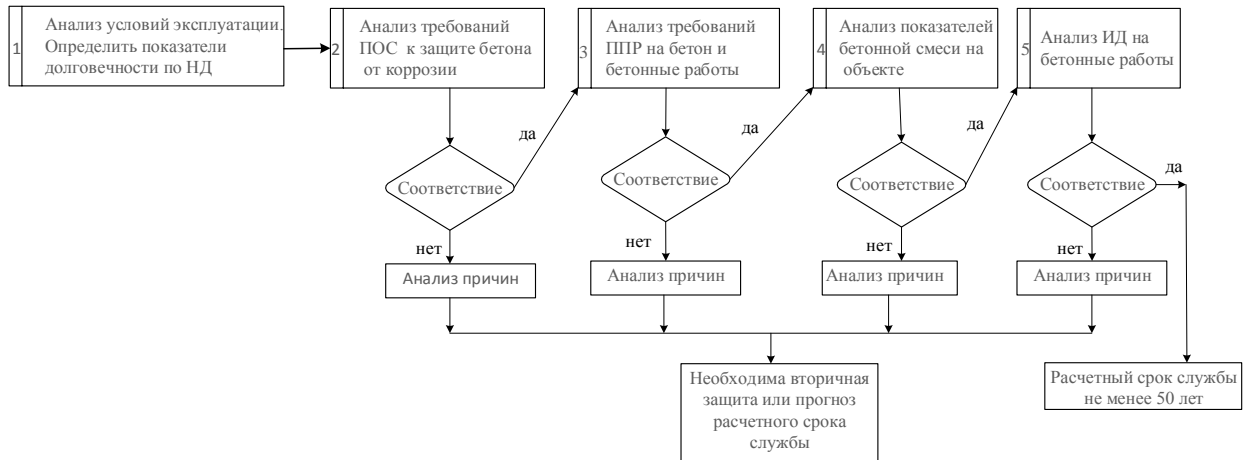


Рис. 5.6. Схема-алгоритм принятия решения при оценке соответствия бетонных конструкций требованиям долговечности в морской воде в условиях замораживания-оттаивания

Процесс экспертизы состоит из последовательных этапов, схема которых представлена на рис. 5.6:

1. Анализ реальных условий эксплуатации конструкций на объекте и установление преобладающего механизма замораживания бетона в конструкциях.

2. Оценка показателей долговечности бетона, принятых на этапе проектирования, для обеспечения срока службы не менее 50 лет в реальных условиях эксплуатации. Показатели оценивают по требованиям действующих НД [4, 66] и рекомендаций, изложенных в разделе 5.1 диссертации. Расчетные значения климатических нагрузок и воздействий допускается назначать в установленном порядке на основе анализа соответствующих климатических данных для места строительства [62] и опыта эксплуатации аналогичных объектов [67, 83].

После оценки формулируются выводы, и при несоответствии проектных требований нормируемым делается прогноз о возможном влиянии установленного несоответствия на эксплуатационные характеристики конструкции, а также формулируются рекомендации по вторичной защите бетона для обеспечения долговечности не менее 50 лет. На этапе проектирования для оценки соответствия могут приниматься другие

показатели, которые имеют доказательную базу на основе экспериментальных исследований для условий места строительства и расположения конструкций в сооружении [67, 83].

3. Анализ разделов ППР, в которых приведены технологические регламенты (технологические карты) на бетонные работы. Необходимо установить обоснованность и достаточность: решений по защите бетона в агрессивной среде; установленных требований к оценке соответствия в форме испытаний и приемки; установленных методов контроля соответствия.

4. Оценка качества бетонной смеси, поступившей на объект, по документам поставщика, подтверждающих гарантию продукции, в частности по протоколам: определения технологических показателей качества бетонных смесей при подборе их состава и проведении операционного и приемо-сдаточного контроля; определения нормируемых показателей качества бетона в проектном возрасте.

При необходимости делается запрос к производителю (поставщику) для получения информации о качестве используемых материалов и номинальному составу бетонной смеси, а также результатов предварительных испытаний бетонной смеси данного номинального состава и бетона по всем указанным в договоре на поставку показателям.

В заключении по экспертизе этапа 4 формулируются выводы, и при несоответствии делается прогноз кинетики коррозии бетона с учетом фактических показателей и реальных условий эксплуатации конструкций.

5. Оценка показателей, характеризующих морозостойкость бетона в конструкции, на основании документов о качестве поставщика продукции (этап 4) и по соответствию реального режима твердения бетона в конструкции режиму, принятому при подборе состава бетона. Для этого на этапе приемки конструкций в эксплуатацию оценивают режим твердения бетона в конструкции показателем зрелости структуры бетона  $S_f$  (формула (5.8)).

Расчет по формуле (5.8) корректен при условии влажностного твердения бетона, т.е. когда в выражении коэффициент  $n_p$  можно принять равным 1.

Отсутствие влажностного режима твердения бетона в конструкциях снижает объективность оценки показателя зрелости структуры бетона ( $S_f$ ) и требует более глубокого анализа последствий этого несоответствия на кинетику развития деградации бетона при эксплуатации. В этом случае необходимо иметь дополнительные данные о фактической морозостойкости бетона в конструкции. Это определяют по пробам бетона из конструкций.

Оценка соответствия выполняется путем сравнения показателя фактической зрелости структуры бетона  $S_f$  с показателем «критической зрелости» структуры бетона  $S_{CR}$ , который характеризует условия твердения бетона, необходимые для формирования дискретной системы капиллярных пор. Долговечность бетона в зоне действия прилива обеспечивается при условии  $N_F \geq 1$ . Оценка соответствия бетона условиям долговечности, приведенная выше, разработана для конструкций зоны действия прилива, где механизм замораживания бетона определяют циклы попеременного замораживания и оттаивания, обусловленные ходом прилива.

Для бетона в зоне действия всплеска волны, где происходит обледенение конструкций, и механизм замораживания бетона определяет длительность замораживания в солевом растворе, к показателю «критическая зрелость структуры» бетона необходимо добавлять показатель, характеризующий количество свободной воды в порах бетона к моменту замораживания, поскольку механизм разрушения бетона будет связан с процессами влагопереноса внутри бетона. Поэтому при анализе состава бетона необходимо иметь в виду, что при высокой подвижности бетона к началу морозного воздействия в структуре бетона объем свободной воды может способствовать ее миграции к зоне промерзания при градиенте температур. Длительное обледенение может приводить к разрушению как поверхностного слоя бетона при наличии в его структуре сообщающейся системы капиллярных пор, так внутренних частей бетона на границе промерзания за счет миграции воды в порах при температурном градиенте.

Исходя из накопленного опыта для условий, когда конструкции подвергаются длительному замораживанию с обледенением, при экспертизе необходимо отмечать и учитывать водосодержание бетонной смеси. В качестве критических показателей бетонной смеси являются:  $OK \leq 10$  см и расход воды  $V_{кр} \leq 175$  л/м<sup>3</sup>. При  $V_{кр} > 175$  л/м<sup>3</sup> целесообразно устанавливать мониторинг состояния конструкций в течение 5 лет, который позволит делать прогноз кинетики деградации на длительный срок и при необходимости разрабатывать рекомендации по дополнительным мерам защиты бетона для обеспечения требуемой долговечности.

Заключение экспертизы строится на выводах и рекомендациях, сделанных на основе анализа всех 5-ти этапов. Бетон будет обеспечивать безремонтный срок службы конструкции не менее 50 лет в агрессивной среде класса XF4 при условии соответствия требованиям долговечности на пяти этапах. В случае несоответствия бетона конструкций хотя бы по одному из заданных параметров долговечности возникает вероятность, что срок службы бетона в конструкции будет менее 50 лет.

### **5.3. Прогнозирование долговечности бетонных конструкций в морской воде в условиях замораживания и оттаивания**

Основные коррозионные процессы в бетоне, который является пористым материалом, связывают с транспортной способностью его поровой структуры. В связи с этим долговечность бетона в условиях морозного воздействия исследуют главным образом в зависимости от параметров порового пространства. Необходимо отметить, что до сих пор нет общепризнанных критериев для оценки строения цементного камня с позиции сопротивления морозному воздействию. Попытки установить количественную связь между морозостойкостью и структурой пор цементного камня и бетона, как правило, наталкиваются на необходимость исследовать многофакторную модель, которая не применима для практического использования.

В нашей работе, рассматривается технический аспект долговечности, поэтому назначение срока службы или продолжительность ЖЦ на этапе эксплуатации рассматривается с позиции обеспечения эксплуатационной пригодности конструкций. Например, для железобетонных конструкций прогноз срока службы можно строить по кинетике снижения прочности бетона в защитном слое ( $R$ ), а для массивных бетонных конструкций – по скорости разрушения поверхностного слоя ( $\tau$ ).

Анализ многочисленных литературных данных, приведенный в главе 1, показывает, что вопрос развития процессов коррозии при морозном воздействии рассматривается без дифференциации процесса коррозии на этапы инициации и деградации.

Результаты исследований, приведенные в главе 3, подтверждают целесообразность принятия для модели прогноза долговечности гипотезы о двухстадийности морозной коррозии бетона. Модель жизненного цикла бетона в период эксплуатации в условиях морозного воздействия, представлена на схеме рис. 5.7.

Несмотря на то, что данная схема является лишь визуализацией периодов жизненного цикла бетона при эксплуатации конструкций, она позволяет определить направление дальнейших исследований.

Срок службы бетона в конструкции, исходя из положений принятой концепции, определяется кинетикой процесса формирования системы структуры пор бетона, определяющей стойкость бетона к морозному воздействию.

В общем случае целесообразно ЖЦ бетона в условиях морозного воздействия рассматривать в зависимости от продолжительности периодов инициации ( $T_{ин}$ ) и деградации ( $T_{дг}$ ), поскольку это позволяет выделить три характерных сценария продолжительности ЖЦ (рис. 5.7):

– сценарий 1: бетон имеет только период инициации  $T_{ин}$ ; жизненный цикл бетона определяют конструктивные процессы в его структуре; развитие структуры соответствует классическому развитию структуры цементных

бетонов в не агрессивных средах; бетон имеет бессрочный срок службы с практической точки зрения;

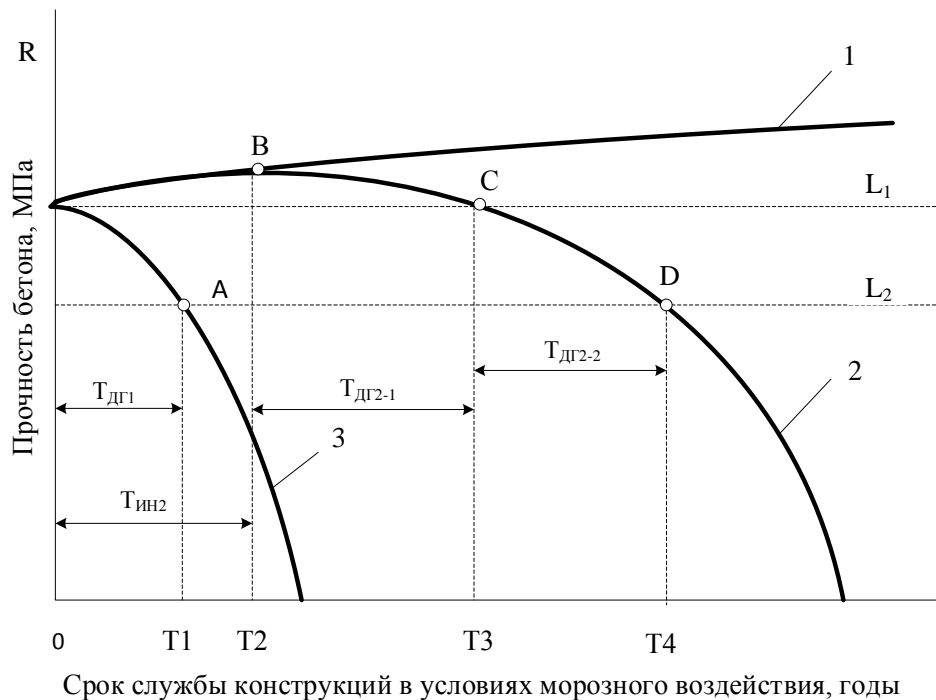


Рис. 5.7. Варианты жизненного цикла бетона при морозном воздействии на основе натуральных исследований:  $L_1$  – уровень ЖЦ по нормативной прочности бетона;  $L_2$  – уровень ЖЦ по эксплуатационным характеристикам бетона; 1 – наличие только периода инициации ( $T_{ин}$ ); 2 – наличие периодов инициации ( $T_{ин}$ ) и деградации ( $T_{дг}$ ); 3 – наличие только периода деградации ( $T_{дг}$ )

– сценарий 2: бетон имеет периоды инициации  $T_{ин}$  и деградации  $T_{дг}$ ; жизненный цикл бетона является интегральной составляющей продолжительности двух периодов, в которых развитие структуры определяют как конструктивные процессы, так и деструктивные;

– сценарий 3: бетон имеет только период деградации  $T_{дг}$ ; жизненный цикл бетона определяют деструктивные процессы в его структуре; кинетика развития деструктивных процессов определяет продолжительность этого периода.

Сценарий 1 характеризует условия эксплуатации бетона, когда водонасыщение не достигает критического уровня, поэтому период инициации является показателем долговечности бетона. В этот период показатели качества бетона соответствуют условиям эксплуатации, поскольку при самом неблагоприятном сочетании факторов, определяющих нагрузку от внешних воздействий, водонасыщение пор не достигает



критической степени ( $S_{CR}$ ). Результаты проведенных исследований показывают, что в этих условиях срок службы бетона становится «вечным», поскольку его продолжительность составляет не менее 100 лет.

Жизненный цикл бетона без ограничения срока эксплуатации визуально представлен в виде графика (1) на схеме рис. 5.7. В этом случае ЖЦ бетона не имеет ограничения, поскольку свойства бетона соответствуют условиям эксплуатации, т.е. бетон не имеет стадии деградации ( $T_{ДГ}$ ). Это является характеристикой долговечного бетона и обеспечивается при реализации условий (5.3) для зоны прилива и (5.4) для зоны всплеска волны.

В литературе есть много высказываний об ограниченном сроке ЖЦ бетона в агрессивных средах класса XF4, т.е. ЖЦ бетона должен состоять из этапов ( $T_{ИН}$ ) + ( $T_{ДГ}$ ), однако результаты проведенных исследования показывают, что это один из возможных сценариев ЖЦ бетона.

Наличие у бетона в ЖЦ только стадии ( $T_{ИН}$ ) подтверждают результаты натурных исследований, представленные в главе 3. Экспериментальные исследования морозостойкости при различных режимах испытаний бетона на морозостойкость дают основания считать, что при определенном сочетании отрицательной температуры и структуры пор протекает только стадия ( $T_{ИН}$ ). В результате фактическое водонасыщение ( $S_{ACT}$ ) не повышается до критического уровня ( $S_{CR}$ ), а наличие жидкой фазы в порах бетона позволяет протекать дальнейшим процессам гидратации цемента.

В реальных условиях кинетика прочности долговечного бетона должна иметь только возрастающий характер, т.е. прочностные показатели не только сохраняются, но и увеличиваются. Однако следует отметить, что имеется порог чувствительности бетона к температуре. Превышение этого порога переводит пассивную часть пор в активную, т.е. создаются условия для критического водонасыщения ( $S_{CR}$ ) без дополнительного водонасыщения пор. По косвенным показателям можно судить, что при  $S_{ACT} < S_{CR}$  создаются благоприятные условия для дальнейшего процесса гидратации цементного камня в соответствии с закономерностями структурной теории. Индикатором

этого процесса является кинетика набора прочности бетона, которая соответствует логарифмической зависимости (3.1).

Результаты, полученные при исследовании, показывают, что стадия инициации ( $T_{ин}$ ) определяется условием:

$$R_0 = R_N, \quad (5.10)$$

где:  $R_0$  – фактическая прочность бетона в конструкции, МПа;  $R_N$  – расчетная прочность бетона в конструкции, МПа, определяемая по формуле (3.1).

Возраст бетона принимается за исключением периода с отрицательными температурами воздуха, т.е. за исключением периода, в который процессы гидратации цемента замедляются или прекращаются.

Стадия деградации, соответственно, определяется условием:

$$R_0 < R_N. \quad (5.11)$$

Как видно, по кинетике прочности бетона на этапе эксплуатации можно определять стадию процесса коррозии бетона в конструкции. Это положение основано на результатах натурных исследований сооружения (глава 3). При этом пробы бетона следует отбирать из неповрежденных участков конструкций, а влияние морозных воздействий оценивать кинетикой набора прочности бетона за период эксплуатации. Это является основой для разработки прогнозных методов долговечности и проектирования бетона по эксплуатационным характеристикам.

Ограниченный срок эксплуатации бетона: сценарий 2 и 3, проявляется при развитии деградационных процессов в структуре бетона. Появляется необходимость определять остаточный ресурс бетона. Кривые (2) и (3) на рис. 5.7 иллюстрируют два сценария ЖЦ бетонов, у которых присутствует период деградации ( $T_{дг}$ ), т.е. при условии водонасыщения пор бетона до критического уровня в период эксплуатации.

Сценарий 2 представлен кривой 2 на рис. 5.7 и характеризует бетон с периодами инициации ( $T_{ин2}$ ) и деградации ( $T_{дг2-1} + T_{дг2-2}$ ). В этом случае не исключается возможность водонасыщения поверхностных слоев до критической степени в процессе эксплуатации. Дифференцирование

процесса деградации на два периода  $T_{дг2-1}$  и  $T_{дг2-2}$  обусловлено тем, что на этапе периода  $T_{дг2-2}$  появляется вероятность оценки кинетики разрушения по внешним признакам. На графике (2) точка В определяет окончание периода инициации и начала процесса микротрещинообразования в структуре бетона без внешних признаков. Следовательно, срок службы может длиться, соответственно, до нормативного уровня – точка С, или работоспособного – точка D. Этот сценарий, исходя из реальных условий эксплуатации, характерен для конструкций транспортных сооружений при использовании ПГМ. В этом случае в процессе эксплуатации возможно дополнительное водонасыщение до критической степени.

Продолжительность ЖЦ бетона с периодами ( $T_{ин}$ ) и ( $T_{дг}$ ) можно определить, зная кинетику процесса водонасыщения бетона при морозном воздействии и закономерность микроразрушения бетона при условии критического водонасыщения:  $S_{ACT} > S_{CR}$ . Как отмечено выше, период инициации  $T_{ин}$  протекает по закономерности общепринятых положений структурной теории цементных бетонов. Общепринятых закономерностей развития деструктивных процессов при морозном воздействии до сих пор не разработано. Это является причиной, ограничивающей возможности прогноза остаточного срока службы конструкций. Поэтому для теории и практики исследование закономерностей разрушения бетона на этапе деградации является актуальным направлением.

Натурные исследования показали, что в морской воде в условиях замораживания-оттаивания долговечность бетона определяет его стойкость к морозным воздействиям, что касается роли агрессивности среды в виде морской воды или химических противогололедных материалов, то этот фактор может проявляться при коррозии бетона на стадии ( $T_{дг}$ ). Это необходимо учитывать при исследовании кинетики деградационных процессов на долговечность в условиях морозного воздействия.

Опыт эксплуатации сооружений показывает, что и при наличии периода деградации ( $T_{дг}$ ) у конструкции могут сохраняться

эксплуатационные характеристики, т.е. работоспособность. Исходя из предложенной концепции коррозии бетона, проектирование долговечности и прогноз срока службы бетонных конструкций при морозосолевым воздействием следует рассматривать из условий долговечности ( $D_B$ ) и эксплуатационной пригодности (работоспособности) ( $T_C$ ).

Сценарий 3 представлен кривой 3 на рис. 5.7 и характеризует бетон, имеющий критическую степень насыщения при первом цикле замораживания, т.е.  $S_{ACT} \geq S_{CR}$ . Повреждение структуры бетона с потерей прочности наступает после первого цикла и развивается в дальнейшем с увеличением количества циклов ЗО. Это, как правило, характерно для бетона в конструкциях морских сооружений на участках действия прилива и в конструкциях, подверженных обработке противогололедными химическими материалами. Характер повреждения может быть явным в виде разрушения поверхностного слоя после первого зимнего сезона и не явным, но с образованием микротрещин, развитие которых будет происходить в последующие зимние сезоны.

На рис. 5.8 представлены схемы разрушения бетона для условия  $S_{ACT} = S_{CR}$ , полученные на основании проведенных исследований. Поврежденный слой бетона без внешних признаков повреждения (рис. 5.8-а) в конструкции можно рассматривать как «жертвенный слой», поскольку он не может обеспечивать прочностные свойства, но может снижать морозное воздействие на глубинные слои неповрежденного бетона.

Интенсивность дальнейшего разрушения бетона в этом случае будет определяться как значением отрицательных температур, так и количеством циклов ЗО. При снижении прочностных характеристик бетона в качестве агрессивных воздействий следует учитывать воздействия от плавающего льда и волн в морских сооружениях.

При отсутствии циклов ЗО, например, в зоне всплеска волн, где нет непосредственного контакта с водой, могут быть условия для дополнительного насыщения пор бетона до критической степени  $S_{CR}$  за счет

миграции влаги из внутренних незамерзших слоев бетона при длительном обледенении конструкций. Экспериментально установлено, что при одностороннем фронтальном замораживании строительных материалов в конструкции возможно водонасыщение пор до критического значения за счет миграции влаги. В этом случае критическая степень насыщения бетона  $S_{CR}$  может располагаться на границе промерзания бетона.

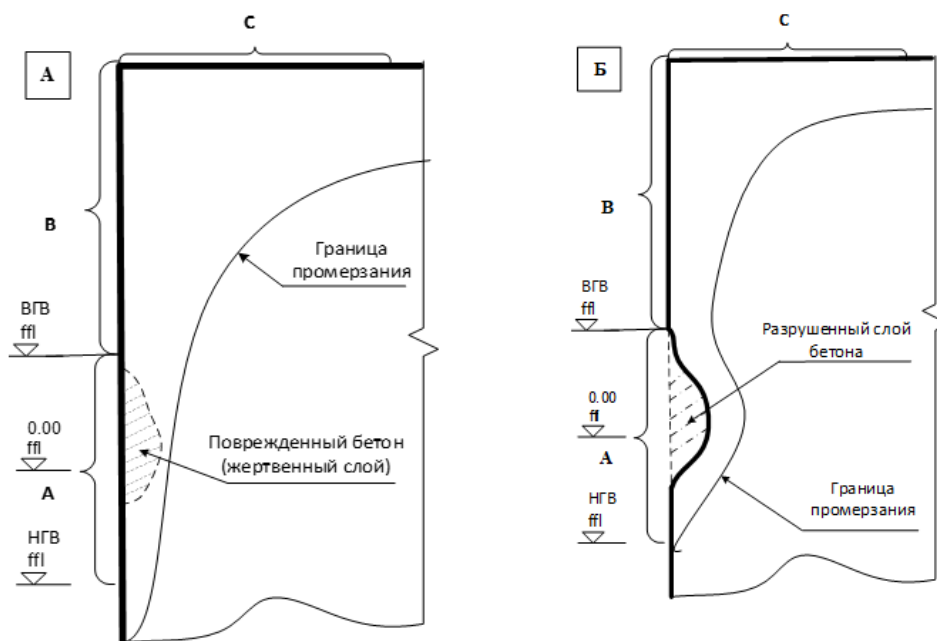


Рис. 5.8. Схема процесса замораживания бетона в зоне переменного уровня на участке прилива-отлива: а) при отсутствии поверхностного разрушения; б) при наличии поверхностного разрушения

Есть основание считать, что наблюдаемое разрушение бетона в виде отслоения части поверхностного слоя в конструкциях морских сооружений в зоне всплеска воды связано с процессами миграции влаги (рис. 3.10-б,в). Следовательно, деградация начинается так же, как и в первом случае, т.е. при  $S_{ACT} \geq S_{CR}$ , но водонасыщение пор до критического уровня идет в процессе длительного одностороннего замораживания в течение зимнего сезона. В дальнейшем кинетика деградации будет зависеть от структуры пор неповрежденного бетона и параметров внешних воздействий, определяющих агрессивность среды класса XF4.

Анализ существующих математических моделей для прогноза срока службы бетона показывает, что их можно использовать для прогноза

остаточного срока службы на стадии деградации, т.е. для бетона, ЖЦ которого развивается по сценарию 3 или по сценарию 2 на этапе стадии деградации. Однако отсутствие в них дифференциации периодов деградации снижает их практическую эффективность. В силу неоднородности свойств бетона разрушение конструкций, например, при локальном характере, протекает с непостоянной скоростью, поэтому для прогноза деградации необходимо иметь представительную выборку для статистической обработки.

Исходя из выражений (5.3) и (5.4) реализация таких параметров как В/Ц; Ц;  $V_{в.в}$  в бетоне с точки зрения его долговечности возможна при коэффициенте структурной зрелости  $N_F \geq 1$ . Результаты проведенных исследований показывают, что при  $N_F < 1$  расчетный срок службы по предварительным данным может снижаться в соответствии с изменением коэффициента значимости влияния фактора  $E$ :  $E = 1$  при  $N_F \geq 1$ ;  $E = 0,5$  при  $N_F = 0,8$ ;  $E = 0,2$  при  $N_F = 0,7$ ;  $E = 0,02$  при  $N_F = 0,6$ .

На рис. 5.9 представлена концепция модели для прогноза остаточного срока службы конструкции, основанная на кинетике деградации бетона в зависимости от вида и характера разрушения бетона в конструкции. Прогноз остаточного срока службы – это оценка эксплуатационной возможности или работоспособности конструкции из недолговечного бетона. Есть все основания полагать, что стадия деградации обусловлена процессами и кинетикой образования микротрещин в структуре бетона, а повреждения от морозного воздействия проявляются в виде разрушения или снижения прочности поверхностного слоя бетона.

Кривая графика 1 (рис. 5.9) характеризует бетон, процесс коррозии которого проявляется в виде внезапного отказа. Как правило, лавинообразно разрушение (внезапный отказ) характеризуется глобальными разрушениями после первого зимнего сезона на участках обледенения (рис. 3.10-б,в). Глобальность процесса разрушения свидетельствует, что имеются принципиальные ошибки, которые могли быть допущены на этапе

проектирования или на этапе строительства. Данный вид разрушения может быть обусловлен двумя причинами:

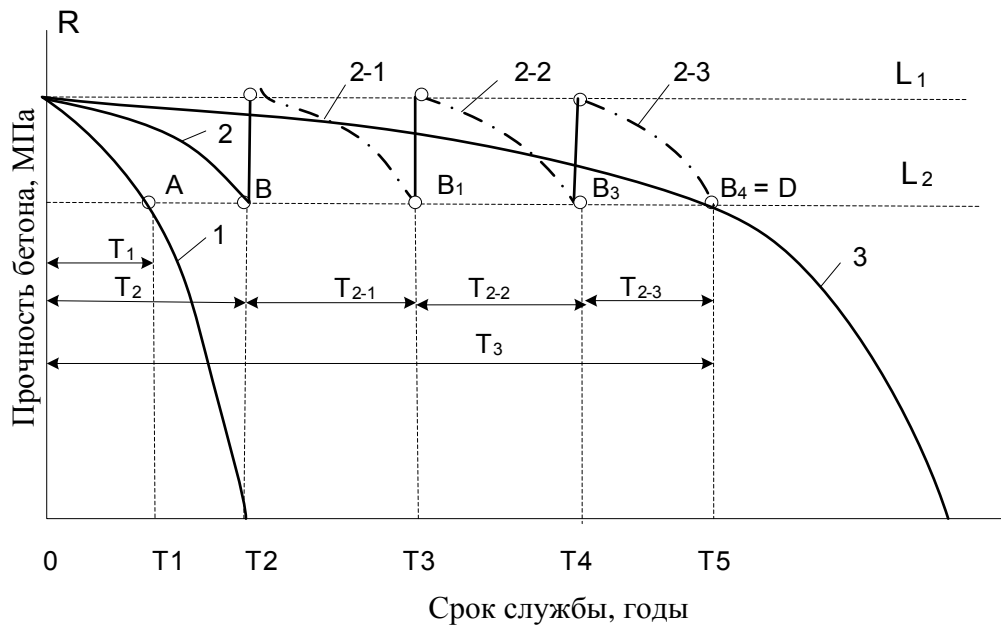


Рис. 5.9. Сценарии прогноза остаточного срока службы конструкций по виду и характеру разрушения бетона:  $L_1$  – уровень ЖЦ по нормативной прочности бетона;  $L_2$  – уровень ЖЦ по эксплуатационным характеристикам бетона. Характер и вид разрушения бетона: 1 – внезапный отказ; 2 – деградационный отказ с локальными поверхностными повреждениями; 3 – деградационный отказ с внутренними повреждениями

1) Бетон не имеет критической зрелости к моменту морозного воздействия, поэтому структура капиллярных пор создает условия для критического водонасыщения к началу морозного воздействия.

2) Бетонная смесь имеет повышенные расходы воды в связи с применением высокоподвижной или литой бетонной смеси, что предопределяет наличие свободной воды, способной к миграции к поверхностному слою и возможности за счет этого создавать критическое водонасыщение пор на границе морозного фронта.

Вторая причина является следствием того, что в предписывающих документах по обеспечению долговечности определены требования к бетону, но технологические аспекты его получения не прописаны. Следует отметить, что зрелость структуры бетона, которая характеризует вид системы капиллярных пор, и наличие свободной воды, которая способна к миграции

при температурном градиенте, зависят от степени гидратации цемента. Поэтому эти две причины за счет синергизма могут повысить эффект морозного воздействия. Разрушение бетона после первого зимнего сезона, т.е. разрушение в виде внезапного отказа, можно прогнозировать по результатам оценки соответствия показателей структурной зрелости бетона и критическому водосодержанию. Это позволит прогнозировать затраты на ремонт поврежденных конструкций и сооружений на этапе эксплуатации.

Кривая графика 2 (рис. 5.9) характеризует развитие деградации при локальных повреждениях бетона, которые обусловлены неоднородностью свойств бетона. Это может быть обусловлено разными причинами. Результаты исследования вида и характера разрушений (глава 3) показывают, что это в основном связано с недоуплотнением или расслоением бетонной смеси, а также с несоблюдением режима тепловой обработки при пропаривании конструкций. Безусловно, невозможно на этапе проектирования долговечности предусмотреть появление и развитие этого дефекта на этапе эксплуатации конструкций.

Наличие и объем локальных разрушений характеризует организационный уровень технологического процесса изготовления конструкций. Несмотря на высокие запасы по морозостойкости бетона, нестабильность технологии является главной причиной появления локальных разрушений. Поэтому дефект в виде локальных разрушений можно исключить на этапе изготовления конструкций путем надлежащего контроля за технологическим процессом. В частности, посредством применения экспертной оценки качества на этапе приемки по методике, представленной в разделе 5.2. При заключении на этапе приемки конструкций, что бетон для конкретных условий эксплуатации является недолговечным, целесообразно предусматривать мониторинг конструкций службой эксплуатационного контроля, которая должна предоставлять информацию о кинетике деградации и необходимых сроках проведения текущего ремонта для восстановления нормативных показателей конструкции. В соответствии с



действующими правилами эксплуатации сооружений [116], это является условием надлежащей эксплуатации.

Требуемый срок службы конструкций с локальными повреждениями можно обеспечить за счет текущего ремонта. Кривые графиков (2-1)-(2-4) на рис. 5.9 показывают, что периодические текущие ремонты позволят поддерживать конструкции в работоспособном состоянии на протяжении требуемого срока службы сооружения. Затраты на текущие ремонты в расчетный срок службы, очевидно, будут определяющим фактором для принятия решений о сроках капитального ремонта или реконструкции сооружения.

Наблюдаемые локальные разрушения бетона различной степени повреждения в зоне прилива являются свидетельством того, что показатели бетона носят статистический характер и проявляются в зависимости от параметров механизма замораживания бетона. На участке действия прилива, как правило, разрушения имеют локальный характер и отличаются масштабом повреждения. Например, в зоне прилива конструкции в сооружении К1 (рис. 5.10) имеют поверхностное разрушения бетона по глубине от нескольких сантиметров до десятка сантиметров, а площадь повреждения от 0,3 до 2,0 м<sup>2</sup>. Есть все основания полагать, что причина этих разрушений связана с тем, что к началу морозного воздействия поры бетона на локальных участках разрушения уже имели критическую степень водонасыщения  $S_{CR}$  или она достигалась после непродолжительного периода инициации [117, 118].

После первого зимнего сезона может происходить как поверхностное, так и объемное разрушение бетона. В последнем случае в массивных конструкциях наблюдается разрушение поверхностного слоя на глубину до 50 мм. Поэтому прогноз по эксплуатационной пригодности целесообразно рассматривать исходя из показателей, которые будут приниматься для оценки работоспособности конструкции.

Преждевременное разрушение конструкций приводит к большим затратам на их ремонт и восстановление и значительно превышает первоначально потраченные средства на обеспечение требуемых мер защиты

от повреждения, особенно при возведении в зоне переменного уровня воды. Окупаемость всех производственных затрат по обеспечению долговечности возможна только в процессе эксплуатации.



Рис. 5.10. Общий вид отдельных участков причальной стенки сооружения К1 (срок эксплуатации 80 лет): а) конструкции с поверхностным разрушением вида  $P_{II}$ ; б) конструкции с локальными разрушениями вида  $P_V$  на глубину 300 мм

### Выводы по главе 5

1. Лавинообразное разрушение бетона после первого зимнего периода служит подтверждением теоретических положений, что в основе механизма разрушения бетона могут быть процессы влагопереноса в структуре бетона под действием длительного замораживания. Этот вид морозного воздействия целесообразно рассматривать в качестве показателя агрессивности для среды класса XF4 и учитывать при проектировании и строительстве, поскольку он является характерным видом внешних воздействий при эксплуатации конструкций морских сооружений на Дальнем Востоке.

2. При морозосолевом воздействии кинетику водонасыщения пор бетона и механизм разрушения бетона определяют механизмы замораживания. В зоне переменного уровня воды имеются два характерных участка с различными

механизмами замораживания бетона: участок прилива, где механизм замораживания бетона определяют температура замораживания и количество циклов замораживания-оттаивания, и участок всплеска волн, где определяющими факторами являются температура замораживания и ее длительность. Поэтому методика проектирования долговечности бетона по предписывающим требованиям должна учитывать эти факторы. Синергетический эффект их взаимодействия может интенсифицировать процесс разрушения бетона.

3. На основе теоретических положений формирования структуры цементных бетонов и механизмов морозного разрушения бетонов предложено для исследований морозостойкости и оценки соответствия бетона требованиям долговечности использовать показатель, характеризующий зрелость структуры бетона к морозному воздействию. Приемка конструкции в эксплуатацию по предложенному показателю – «критическая зрелость структуры бетона», позволяет оценивать качество реализации проектных решений на этапе строительства и достаточность проектных решений для обеспечения долговечности конструкций на этапе эксплуатации.

4. При расчете состава бетонной смеси необходимо ограничивать водосодержание, т.к. этот показатель к началу морозного воздействия будет определять наличие свободной воды в бетоне, способной к миграции при градиенте температур. Объем информации о влиянии ( $V_{кр}$ ) на стойкость бетон к длительному замораживанию ограничен, но практический опыт показывает, что на данном этапе целесообразно для конструкций, подверженных длительному замораживанию с обледенением, ограничивать применение смесей с ОК более 10 см и расходом воды в бетонной смеси более  $175 \text{ л/м}^3$ .

5. В условиях длительного замораживания бетона в солевых растворах критическими показателями долговечности бетона являются степень гидратации цемента и содержание воды в бетонной смеси. Анализ факторов, влияющих на стойкость бетона в условиях морозного воздействия, показывает, что существует «критический» расход воды для бетонной смеси, превышение которого резко сокращает долговечность бетона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научная задача установления механизма деградации бетона в зоне переменного уровня воды при морозном воздействии для разработки модели его реальной работы в конструкции применительно к расчету-прогнозу срока службы, проектированию, технологии долговечного бетона в морской воде в условиях замораживания-оттаивания. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. В агрессивных средах класса XF4 преобладают два вида механизма замораживания бетона: механизм гидравлического давления воды и механизм кристаллизационного давления льда, которые обуславливают разные механизмы разрушения бетона. Поэтому методику проектирования долговечности бетона по предписывающим требованиям необходимо дополнить: составы бетона назначать с учетом преобладающего механизма замораживания бетона в конструкции. Целесообразно для конструкций, подверженных длительному замораживанию с обледенением, ограничивать применение смесей с ОК более 10 см и расходом воды в бетонной смеси более 175 л/м<sup>3</sup>.

2. Характер и кинетика разрушения бетона в зоне переменного уровня воды подтверждают основные теоретические положения морозной коррозии: в основе механизма разрушения бетона при морозном воздействии лежат процессы водонасыщения, кинетику которых определяют механизмы замораживания бетона в конструкции. В зоне переменного уровня воды имеются два характерных участка с различными механизмами замораживания бетона: *участок прилива*, где механизм замораживания бетона определяют температура замораживания и количество циклов замораживания-оттаивания, и *участок всплеска волн*, где определяющими факторами являются температура замораживания и ее длительность. Долговечность бетона формируется в ранний период структурообразования и

определяется двумя критическими показателями: видом системы капиллярных пор и наличием свободной воды, способной к влагопереносу к зонам промерзания. Для практического применения рекомендовано на этапе строительства оценку соответствия по долговечности выполнять по «критической зрелости структуры» и «критическому водосодержанию» бетонной смеси.

3. Характерные случаи разрушения бетона в зоне переменного уровня в условиях длительного обледенения после первого зимнего сезона, т.е. через 3-4 месяца эксплуатации, свидетельствуют о необходимости параметр длительности замораживания при обледенении в течение 60-90 суток рассматривать как фактор агрессивности. К общепринятым показателям агрессивности среды класса XF4: температура замораживания и циклы попеременного замораживания и оттаивания, необходимо добавить факторы: длительность воздействия отрицательной температуры и вид среды замораживания. Целесообразно нормы по защите бетона в агрессивной среде класса XF4 актуализировать с учетом реальных условий эксплуатации сооружений и рассматривать длительность морозного воздействия как фактор агрессивности.

4. Разработана математическая модель теплообменных процессов цикла «замораживание – оттаивание» в железобетонной конструкции гидротехнического сооружения, учитывающая явления фазового перехода на границе раздела зон. Математический и графический анализ, основанный на «методе микропроцессов» и качественно характеризующий тепловые процессы, протекающие в железобетонной конструкции на стадиях замораживания и оттаивания, позволяет определять теоретическое время достижения границы промерзания бетона.

5. Проектирование и прогнозирование долговечности бетона в морской воде в условиях замораживания-оттаивания целесообразно выполнять на основе модели, в которой процесс коррозии бетона при морозном воздействии представлен как двухстадийный с наличием стадий инициации и

деградации. Современная технология бетона, основанная на предписывающем подходе проектирования долговечности, позволяет обеспечить высокие запасы бетону по морозостойкости. Подтверждена высокая эффективность отечественных технологических разработок в получения долговечных бетонов для конструкций морских портовых сооружений. Применение в бетоне отечественных воздухововлекающих добавок ПАВ типа СНВ (0,01-0,02 масс. %), С-3 (0,02 масс. %), ПФМ (НЛК) (0,5-0,6 масс. %) и комплексных на их основе позволяет обеспечить срок службы конструкциям в условия дальневосточных морей не менее 50 лет.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанова, В.Ф. Современные проблемы обеспечения долговечности железобетонных конструкций / В.Ф. Степанова, В.Р. Фаликман // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: Научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: в 7 томах. Том 3. – М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2014. – С. 430-444.
2. Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability: State-of-the-Art Report RILEM TC 230-PSC / H. Beushausen, L. Fernandez Luco (eds.). – Springer, Dordrecht, 2016. – 391 p.
3. Durability design of concrete structures: report of RILEM Technical Committee 130-CSL / A. Sarja, E. Vesikari (eds.). – London, CRC Press, 1996. – 165 p.
4. ГОСТ ISO 15686-7-2015 Здания и недвижимое имущество. Планирование срока службы. Часть 7. Оценка технического состояния существующих зданий по результатам обследования.
5. Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства РФ до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Распоряжение Правительства РФ от 31.10.2022 г. № 3268-р.
6. Национальная программа социально-экономического развития Дальнего Востока на период до 2024 года и на перспективу до 2035 года. Распоряжение Правительства РФ от 24.09.2020 г. № 2464-р.
7. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций / Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко, В.Н. Ярмаковский, В.Т. Ерофеев // Academia. Архитектура и строительство. – 2015. – № 1. – С. 93-102.
8. Москвин, В.М. Коррозия бетона / В.М. Москвин. – М.: Госстройиздат, 1952. – 344 с.
9. Кунцевич, О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера / О.В. Кунцевич. – Л.: Стройиздат: Ленинградское отделение, 1983. – 131 с.

10. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шиссль; Под ред. Ф.М. Иванова. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.
11. Горчаков, Г.И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений / Г.И. Горчаков, М.М. Капкин, Б.Г. Скрамтаев. – М.: Стройиздат, 1965. – 195 с.
12. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементных бетонов / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
13. Powers, T.C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete / T.C. Powers // *Proceedings of the American Concrete Institute*. – 1945. – Vol. 41. – Pp. 245-272.
14. Malyuk, V.V. Degradation and sudden failure of concrete structures of marine hydraulic structures in severe hydrometeorological operating conditions / V.V. Malyuk // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 463. – 022071.
15. СП 41.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87.
16. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузеев; Под ред. В.М. Москвина. – М. Стройиздат, 1980. – 536 с.
17. Гладков В.С. Современное состояние проблемы морозостойкости бетона транспортных сооружений / В.С. Гладков // *Вопросы долговечности бетона транспортных сооружений: сб. науч. тр. ЦНИИСа*. – М.: ВНИИ трансп. стр-ва, 1979. – С. 4-13.
18. Славчева, Г.С. Влияние структуры высокопрочных модифицированных бетонов на дилатометрические эффекты при их замораживании / Г.С. Славчева, Е.М. Чернышов // *Вестник инженерной школы ДВФУ*. – 2015. – № 1 (22). – С. 53-62.



19. Тринкер, Б.Д. Морозостойкость бетона и методика его испытания / Б.Д. Тринкер // Морозостойкость бетона: сб. тр. НИИЖБ. – М.: Госстройиздат, 1959. – Вып. 12. – С. 27-43.

20. Подвальный, А.М. О концепции обеспечения морозостойкости бетона в конструкциях зданий и сооружений / А.М. Подвальный // Строительные материалы. – 2004. – № 6. – С. 4-6.

21. Бакланов, А.С. Исследование влияния условий службы на долговечность бетона строительных конструкций гидротехнических сооружений в Кольском заливе: Автореферат дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т трансп. строительства. – Мурманск: [б.и.], 1967. – 27 с.

22. Свиридов, В.Н. Исследование морозостойкости бетонов морских сооружений из местных материалов и способов ее повышения: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : (05.23.05). – Москва: [б.и.], 1979. – 22 с.

23. Коррозия бетона морских гидротехнических сооружений / Ф.М. Иванов, И.Б. Улановский, З.Ф. Дорофеева, К.Д. Ходиков // Гидротехническое строительство. – 1980. – № 8. – С. 29-31.

24. Виноградова, Э.А. Бетоны высокой морозостойкости / Э.А. Виноградова // Бетон и железобетон. – 1967. – № 10. – С. 24-26.

25. Морозостойкий бетон для морских гидротехнических сооружений / Ф.М. Иванов, Э.А. Виноградова, В.С. Гладков, И.Н. Усачев // Бетон и железобетон. – 1983. – № 3. – С. 40-41.

26. Иванов, Ф.М. Опыт строительства морских гидротехнических сооружений из железобетона в суровых климатических условиях / Ф.М. Иванов, А.С. Бакланов. – М.: Оргтрансстрой, 1967. – 24 с.

27. Powers, T.C. Theory of volume changes in hardened portland-cement paste during freezing / T.C. Powers, R.A. Helmuth // Highway Research Board Proceedings. – 1953. – Vol. 32. – Pp. 285-297.

28. Powers, T.C. Structure and physical properties of hardened Portland cement paste / T.C. Powers // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1958. – Vol. 41. – Issue 1. – Pp. 1-6.
29. Стольников, В.В. Исследование по гидротехническому бетону / В.В. Стольников. – М.-Л.: Госэнегоиздат, 1962. – 330 с.
30. ГОСТ 10060-2012 Бетоны. Методы определения морозостойкости.
31. Добролюбов, Г. Прогнозирование долговечности бетона с добавками: монография / Г. Добролюбов, В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг; Под Ред. В.Б. Ратинова. – М.: Стройиздат, 1983. – 213 с.
32. Шейкин, А.Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости / А.Е. Шейкин, Л.М. Добшиц. – Л.: Стройиздат: Ленингр. отд-ние, 1989. – 127 с.
33. Состав, структура и свойства цементных бетонов: монография / Г.И. Горчаков, В.И. Орендлихер, В.И. Савин, В.В. Воронин, Л.А. Алимов, И.П. Новикова. – М.: Стройиздат, 1976. – 145 с.
34. Шестоперов, С.В. Долговечность бетона транспортных сооружений / С.В. Шестоперов. – М.: Изд-во Транспорт, 1966. – 500 с.
35. Fagerlund, G. Critical degrees of saturation at freezing of porous and brittle materials. Ph.D. Thesis. – Lund University, Lund, Sweden, 1973. – 411 p.
36. Powers, T.C. The air requirement of frost-resistant concrete / T.C. Powers // *Highway Research Board Proceedings*. – 1949. – Vol. 29. – Pp. 184-211.
37. Пособие по производству и приемке работ при строительстве новых, реконструкции и расширении действующих гидротехнических морских и речных транспортных сооружений (к СНиП 3.07.02-87). – М.: ВНИИ транспортного строительства, 1991.
38. ГОСТ 25192-2012 Бетоны. Классификация и общие технические требования.
39. Fagerlund, G. Frost Destruction of Concrete – A Study of the Validity of Different Mechanisms / G. Fagerlund // *Nordic Concrete Research*. – 2018. – No. NCR 58. – Issue 1. – Article 3. – Pp. 35-54.

40. Пухонто, Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений / Л.М. Пухонто. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 424 с.

41. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: монография: в 2 ч. Ч. 2. / С.Н. Леонович, Д.А. Литвиновский, О.Ю. Чернякевич, А.В. Степанова. – Минск: изд-во БНТУ, 2016. – 204 с.

42. Мощанский, Н.А. О механизме разрушения бетона при замораживании и морозостойкости бетонов в суровых условиях службы сооружений / Н.А. Мощанский // Морозостойкость бетона: сб. тр. НИИЖБ. – М.: Госстройиздат, 1959. – Вып. 12. – С. 5-18.

43. Zuber, B. Predicting the volume instability of hydrated cement systems upon freezing using poro-mechanics and local phase equilibria / B. Zuber, J. Marchand // Materials and Structures. – 2004. – Vol. 37. – Pp. 257-270.

44. Шестовицкий, Д.А. Прогнозирование срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.23.11 / Д.А. Шестовицкий; [Место защиты: Науч.-исслед. ин-т транспортного строительства]. – Санкт-Петербург, 2017. – 28 с.

45. Невилль, А.М. Свойства бетона / А.М. Невилль; сокр. пер. с англ. канд. техн. наук В.Д. Парфенова и Т.Ю. Якуб. – М.: Стройиздат, 1972. – 344 с.

46. Научные основы математического моделирования коррозионного массопереноса цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, Ю.В. Манохина // Сб. докладов III Междунар. семинара-конкурса молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей. – СПб: Изд-во «АлитИнформ», 2012. – С. 93-97.

47. Чернышов, Е.М. Морозная деструкция бетонов. Часть 1. Механизм, критериальные условия управления / Е.М. Чернышов // Строительные материалы. – 2017. – № 9. – С. 40-46.

48. Fagerlund, G. A service life model for internal frost damage in concrete / G. Fagerlund // Report TVBM. – Lund, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, 2004. – Vol. 3119. – 135 p.

49. Румянцева, В.Е. Роль вяжущего в процессе коррозии бетона / В.Е. Румянцева, М.Е. Шестеркин, Ю.В. Манохина // Информационная среда вуза: материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф. – Иваново: ИГАСУ, 2010. – С. 538-542.

50. Гладков, В.С. Рост прочности морозостойких бетонов после пропаривания / В.С. Гладков, Б.И. Поляков, Т.К. Егорычева / Вопросы долговечности бетона транспортных сооружений: сб. науч. тр. ЦНИИСа. – М.: ВНИИ трансп. стр-ва, 1979. – С. 41-48.

51. Свиридов, В.Н. Оценка долговечности бетона в конструкциях морских сооружений по опыту строительства на Дальнем Востоке / В.Н. Свиридов, В.Д. Малюк // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: в 7 т., Том 3. – Москва: МИСИ-МГСУ, 2014. – С. 388-398.

52. Свиридов, В.Н. Применение технологии высокоморозостойких бетонов в практике морского гидротехнического строительства на Дальнем Востоке / В.Н. Свиридов, В.Д. Малюк // Стихия. Строительство. Безопасность: сб. трудов. – Владивосток: Дальнаука, 2008.

53. Свиридов, В.Н. Опыт применения комплексных добавок ПАВ в бетонах для морского гидротехнического строительства на Дальнем Востоке / В.Н. Свиридов, В.И. Митина, Р.С. Мелехина // Научно-технический семинар коррозия и защита железобетонных гидротехнических сооружений: сб. тезисов докладов. – Южно-Сахалинск, 1989.

54. Иванов, Ф.М. Бетон и железобетон в суровых климатических условиях / Ф.М. Иванов // Применение железобетонных конструкций транспортных сооружений в суровых климатических условиях: сб. научных трудов ЦНИИСа. – М.: ЦНИИС, 1974. – Вып. 78. – С. 5-13.

55. Гладков, В.С. Однородность бетона по морозостойкости / В.С. Гладков, Ф.М. Иванов // В сб. научных трудов ВНИИ транспортного строительства. – М.: ВНИИ трансп. стр-ва, 1969. – № 70.

56. Fagerlund, G. Freeze-thaw resistance of concrete: destruction mechanisms, concrete technology, test methods, quality control: a contribution to the BRITE/EURAM project BREU-CT92-0591 «The Residual Service Life of Concrete Structures» / G. Fagerlund // Report TVBM. – Lund, Division of Building Materials, LTH, Lund University, 1995. – Vol. 3060. – 73 p.

57. Подвальный, А.М. Влияние коррозионных повреждений на процесс коррозии бетона / А.М. Подвальный // Коррозионные бетоны и железобетонные конструкции: сб. научных трудов НИИЖБ. – М.: НИИЖБ, 1981. – С. 54-64.

58. EN 206:2013 Concrete – Specification, performance, production and conformity.

59. Kuosa, H. Freeze-thaw testing, CSLA Projekt – Task 1. Literature Review / H. Kuosa, M. Ferreira, M. Leivo // Research report VTT-R-07364-12. – VTT technical Research Centre of Finland, 2013. – 40 p.

60. ГОСТ 4800-59 Бетон гидротехнический. Методы испытаний бетона.

61. CEN/TR 15177:2006 Testing the freeze-thaw resistance of concrete. Internal structural damage.

62. ГОСТ 31384-2017 Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования.

63. ВСН 150-93 Указания по повышению морозостойкости бетона транспортных сооружений. – М.: АО корпорация «Трансстрой», 1993.

64. DIN CEN/TS 12390-9-2017 Testing hardened concrete – Part 9: Freeze-thaw resistance with de-icing salts – Scaling.

65. Розенталь, Н.К. Проблемы коррозионного повреждения бетона / Н.К. Розенталь // Бетон и железобетон. – 2007. – № 6. – С. 29-30.

66. ГОСТ 33199.2-2014 Здания и недвижимое имущество. Планирование срока службы. Часть 2. Процедуры оценки и прогнозирования срока.

67. СП 28.13330.2017 Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85.
68. СНиП 3.07.02-87 Гидротехнические морские и речные транспортные сооружения.
69. Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ.
70. Royak, G.S. Portland blast-furnace cement for high durability concrete based on local building materials (about strength of Portland blast-furnace cement-based concrete in marine structures) / G.S. Royak, V.N. Sviridov, V.D. Malyuk // Proceedings of International Conference on Building Materials. – Weimar, Germany, 2012. – Vol. 2. – Pp.747-753.
71. СП 58.13330.2012 Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003.
72. Свиридов, В.Н. Оценка агрессивности природных условий на побережье о. Сахалин с учетом состояния сооружений / В.Н. Свиридов // Вопросы долговечности бетона транспортных сооружений: сб. научных трудов ЦНИИСа. – М.: ВНИИ трансп. стр-ва, 1979. – С. 14-21.
73. Гладков, В.С. Оценка суровости климатических условий при назначении морозостойкости бетона / В.С. Гладков, Ф.М. Иванов // Исследование деформаций, прочности и долговечности бетона транспортных сооружений: сб. научных трудов ЦНИИСа. – М.: ВНИИ трансп. стр-ва, 1969. – Вып. 70. – С. 131-138.
74. Бакланов, А.С. Проблемы внедрения железобетона в морском гидротехническом строительстве на Крайнем Севере / А.С. Бакланов // Применение железобетонных конструкций транспортных сооружений в суровых климатических условиях: сб. научных трудов ЦНИИСа. – М.: ВНИИ трансп. стр-ва, 1974. – Вып. 78. – С. 14-22.
75. Fagerlund, G. The critical flow distance at freezing of concrete – theory and experiment / G. Fagerlund // Nordic Concrete Research. – 2017. – No. 56. – Pp. 35-53.

76. Zeng, Q. Heterogeneous nucleation of ice from supercool NaCl solution confined in porous cement paste / Q. Zeng, K.F. Li, T. Fen-Chong // *Journal of Crystal Growth*. – 2015. – Vol. 409. – Pp. 1-9.

77. Bumanis, G. Chloride penetration coefficient and freeze-thaw durability of waste metakaolin containing high strength self-compacting concrete / G. Bumanis, D. Bajare // *International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering Conference segment on Service Life of Cement-Based Materials and Structures*. – Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2016. – Vol. 2. – Pp. 435-442.

78. Sarja, A. Reliability principles, methodology and methods for lifetime design / A. Sarja // *Materials and Structures*. – 2010. – Vol. 43. – Pp. 261-271.

79. Vesikari, E. Service life design of concrete subject to frost attack and carbonation/chloride penetration / E. Vesikari, M. Ferreira // *From Composition to Service Life Design: V International PhD Student Workshop on Durability of Reinforced Concrete*. – VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, 2012. – Pp. 142-161.

80. Effect of coupled deterioration mechanisms on concrete durability in cold environments / M. Ferreira, H. Kuosa, M. Leivo, E. Holt // *23rd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology 2015 (SMiRT 23)*. – Manchester, United Kingdom, 2015. – Division I. – Paper ID 220.

81. Field and Laboratory Testing and Service Life Modelling in Finland / H. Kuosa, E. Vesikari, E. Holt, M. Leivo // *Nordic Exposure Sites – Input to revision of EN206-1: Workshop Proceedings from a Nordic Miniseminar*. – Hirtshals, Denmark, The Nordic Concrete Federation (NCF), 2008. – Pp. 181-208.

82. Fagerlund, G. Moisture design with regard to durability – With special reference to frost destruction / G. Fagerlund // *Report TVBM*. – Lund, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, 2006. – Vol. 3130. – 131 p.

83. ГОСТ Р 54523-2011 Портовые гидротехнические сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

84. ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
85. ГОСТ 22690-2015 Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля.
86. ГОСТ 28570-2019 Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций.
87. ГОСТ 12730.5-2018 Бетоны. Методы определения водонепроницаемости.
88. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
89. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
90. ГОСТ 12730.3-2020 Бетоны. Метод определения водопоглощения.
91. Скрамтаев, Б.Г. Способы определения состава бетона различных видов / Б.Г. Скрамтаев, П.Ф. Шубенкин, Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1966. – 160 с.
92. ГОСТ 12730.4-2020 Бетоны. Методы определения параметров пористости.
93. ГОСТ 5382-2019 Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа.
94. ГОСТ 10181-2014 Смеси бетонные. Методы испытаний.
95. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том IX. Охотское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б.Х. Глуховского, Н.П. Гоптарева, Ф.С. Терзиева. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1998. 342 с.
96. СП 131.13330.2020 «СНиП 23-01-99\* Строительная климатология».
97. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения.
98. Голубых, Н.Д. Методы оценки стойкости бетона в суровых климатических условиях и агрессивной среде: Автореф. дис. на соиск. учен.



степени канд. техн. наук. (05.23.08) / Науч.-исслед. ин-т бетона и железобетона «НИИЖБ». – Москва: [б. и.], 1975. – 25 с.

99. Технические указания по технологии изготовления и защите бетонных и железобетонных конструкций морских гидротехнических сооружений в суровых климатических условиях. ВСН 118-65. – М.: Оргтрансстрой, 1965. – 63 с.

100. Малюк, В.В. Технология бетона для конструкций морских сооружений в условиях морозного воздействия / В.В. Малюк // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2023. – № 3 (56). – С. 121-130.

101. Li, K. Durability Design of Concrete Structures: Phenomena, Modeling, and Practice / K. Li. – John Wiley & Sons, Singapore Pte. Ltd., 2016. – 299 p.

102. Федосов, С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии / С.В. Федосов. – Иваново: ИПК «ПресСто», 2010. – 363 с.

103. Федосов, С.В. Методы математической физики в приложениях к проблемам коррозии бетона в жидких агрессивных средах / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников. – М.: АСВ, 2021. – 246 с.

104. Коррозия строительных материалов: проблемы, пути решения / С.В. Федосов, В.Ф. Степанова, В.Е. Румянцева, В.Г. Котлов, А.Ю. Степанов, В.С. Коновалова. – М.: Издательство АСВ, 2022. – 400 с.

105. Промерзание влажных грунтов, оснований и фундаментов / С.В. Федосов, Р.М. Алоян, А.М. Ибрагимов, Л.Ю. Гнедина, Л.Н. Аксаковская. – М.: АСВ, 2005. – 277 с.

106. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.

107. Лыков, А.В. Тепломассообмен / А.В. Лыков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

108. ГОСТ 27006-2019 Бетоны. Правила подбора состава.

109. Swamy, R.N. Sustainable Concrete for the 21st Century Concept of Strength through Durability / R.N. Swamy // Japan Society of Civil Engineers, Concrete Committee Newsletter. – 2008. – Vol. 13.

110. Neville, A.M. Concrete Technology / A.M. Neville, J.J. Brooks. – 2<sup>nd</sup> Edition. – Pearson Education Canada, 2010. – 464 p.

111. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.

112. СП 435.1325800.2018 Конструкции бетонные и железобетонные монолитные. Правила производства и приемки.

113. ГОСТ Р 57359-2016/EN 13670:2009 Конструкции бетонные. Правила изготовления.

114. Леонович, С.Н. Долговечность бетона в агрессивных средах класса XF4. Проектирование и прогнозирование / С.Н. Леонович, К.Б. Строкин, В.В. Малюк // Строительные материалы. – 2023. – № 10 (818). – С. 4-8.

115. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.

116. Hilsdorf, H.K. Concrete compressive strength, transport characteristics and durability / H.K. Hilsdorf // J. Kropp, H.K. Hilsdorf (eds.). RILEM Report 12. Performance criteria for concrete durability: state of the art report prepared by RILEM Technical Committee TC 116-PCD, Performance of Concrete as a Criterion of its Durability. – London, E & FN SPON, 1995. – 210 p.

117. Малюк, В.В. Концепция долговечности бетона для прогноза срока службы конструкций в условиях морозного воздействия / В.В. Малюк // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2020. – № 4 (45). – С. 105-115.

118. Malyuk, V.V. Operating conditions and damage to the concrete of port facilities on the southern coast of Sakhalin / V.V. Malyuk, V.D. Malyuk, A.V. Lobodyuk // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022 – Chapter 4. – Article no. 052035.

# **ПРИЛОЖЕНИЯ**



Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства  
строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации»  
**Филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России»**  
Дальневосточный научно-исследовательский, проектно-  
конструкторский и технологический институт по строительству  
(Филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» ДальНИИС)



690033, г. Владивосток, ул. Бородинская, 14, ОГРН 1027700245825, ИНН/КПП 7736115684/254343001  
Тел. 8 (423) 236-00-23, E-mail: [info@dalniis.ru](mailto:info@dalniis.ru), Сайт: [www.dalniis.ru](http://www.dalniis.ru)

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной работе,

Доктор технических наук,

Член-корреспондент РААСН

*С.В. Вавренюк* С.В. Вавренюк

«08» ноября 2023г.



**АКТ**

**о внедрении результатов диссертационной работы В.В. Малюка  
«Долговечность конструкционного бетона при морозных и солевых  
воздействиях (на примере о. Сахалин)».**

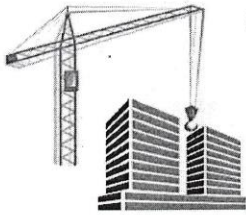
Настоящим подтверждается, что практические рекомендации, разработанные в диссертационной работе В.В. Малюка, использованы в технических условиях (ТУ) на изготовление тетраподов массой 16 т., которые используются при строительстве объекта «Реконструкция входных молов морского порта Холмск, Сахалинская область» по государственному контракту № РТМ-136/22 от «24» августа 2022г.

Малюк В.В. принимает непосредственное участие в научно-техническом сопровождении строительства данного объекта, которое выполняет филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» ДальНИИС.

Ученый секретарь

*Т.Ю. Русанова*

Т.Ю. Русанова



**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ**

**«САХАЛИНСТРОЙИНВЕСТ»**

**ИНН 6501266556 КПП 650101001 ОГРН 1146501005860**

**693005 г. Южно-Сахалинск, ул. Западная, д. 17**

**тел: 8 (4242) 500-147, E-mail: 500147@inbox.ru**

10 ноября 2023 г.

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы В.В. Малюка «Долговечность конструкционного бетона при морозных и солевых воздействиях (на примере о. Сахалин)»

Методики проектирования бетонных смесей, предлагаемые Малюком Владиславом Викторовичем на основании результатов диссертационной работы, применяются при разработке технологических регламентов для изготовления конструкций морских гидротехнических сооружений на о. Сахалин. В частности, применяли при строительстве объектов морской инфраструктуры на заводе сжиженного газа (СПГ) по проекту Сахалин-2, которые возводились в 2010 – 2022 г.г. За счет оптимизации технологии при изготовлении бетонной смеси с марками по морозостойкости F<sub>200</sub> и F<sub>300</sub> снижена себестоимость соответственно на 225 и 310 руб. на 1 м<sup>3</sup>.

Малюк В.В. принимал непосредственное участие в организации лабораторного контроля и технологии бетонных работ на строительных площадках.

Генеральный директор  
ООО «СахалинСтройИнвест»



В.Г. Ким



Общество с ограниченной ответственностью  
**«МИДО»**

Юридический адрес: 694620, Сахалинская область, г. Холмск, пер. Маячный, д. 2  
Почтовый адрес: 694620, Сахалинская область, г. Холмск, ул. Победы, д. 24 «А»  
☎ (42433) 5-78-43, 5-14-75; www.mido.pro; E.mail: office@mido.pro  
ИНН 6500001797; КПП 650001001



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы В.В. Малюка «Долговечность конструкционного бетона при морозных и солевых воздействиях (на примере о. Сахалин)»

Результаты диссертационной работы В.В. Малюка использованы при разработке программ обследования конструкций морских сооружений и раздела рабочей документации по антикоррозионной защите бетонных и железобетонных конструкций морских портовых сооружений в условиях побережья Охотского и Японского морей. Двадцатипятилетний опыт работы ООО «МИДО» в таких областях как комплексное обследование, проектирование и ремонт морских портовых сооружений на Дальнем Востоке дает основания считать, что установленный факт агрессивности внешних воздействий в виде длительного обледенения конструкций необходимо учитывать при разработке мер первичной защиты бетона в агрессивных средах класса XF4 на стадиях проектирования и ремонта. Это позволит исключить разрушения бетона на ранних стадиях эксплуатации морских портовых сооружений, что является характерным дефектом.

Случае разрушение бетона в зоне переменного уровня после первого года являются установленным фактом, причины которого, как правило, на этапе строительства и эксплуатации не подвергаются глубокому анализу. Поэтому наблюдается тенденция перехода таких дефектов в разряд характерных для практики морского гидротехнического строительства. Непредвиденные затраты на восстановление конструкций после 2 – 3-х лет эксплуатации являются подтверждением необходимости совершенствовать методы проектирования и технологию бетона для повышения надежности обеспечения нормируемых сроков службы конструкций.

Затраты на ремонт бетона в зоне переменного уровня могут на 70 – 120 % превышать затраты на ремонт конструкций в обычных условиях из-за сложности подготовки конструкций к ремонту и необходимости применения специальных дорогостоящих приемов защиты бетона и самих бетонных работ.

В силу объективных причин в зоне переменного уровня сложно качественно выполнить ремонта в зоне переменного уровня. Это является причиной сокращения в 3 – 5 раз прогнозируемого срока долговечности бетона после ремонта.

Характер разрушений бетона в конструкциях дает основания считать, что предложения Малюка В.В. по разработке составов бетона и контроля качества бетонных работ на этапе приемки конструкций позволит исключить преждевременные разрушения и обеспечить срок службы конструкций не менее 50 лет.

Главный инженер ООО «МИДО»  Шаповрев В.М.





МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САХАЛИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ОКПО 48714232, ОГРН 1026500534720, ИНН/КПП 6500005706/650101001  
693008, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290, почтовый адрес: Коммунистический пр-кт, 33 693000  
Тел. (4242) 45-23-01, Факс (4242) 45-23-00  
E-mail: [rector@sakhgu.ru](mailto:rector@sakhgu.ru), [www.sakhgu.ru](http://www.sakhgu.ru)

УТВЕРЖДЕНО  
Ио ректора СахГУ  
А.С. Самардан  
«09» сентября 2023 г.



**АКТ**

**о внедрении результатов диссертационной работы Малюка Владислава Викторовича на тему «Долговечность конструкционного бетона при морозных и солевых воздействиях (на примере о. Сахалин)» в учебный процесс**

Комиссия ФГБОУ ВО Сахалинского государственного университета в составе:

- проректор, к.ю.н., доцент Хурчак Н.М.;
- директор департамента образовательных программ, Дрокина Н.Н.;
- начальник отдела программ высшего образования, Краснобаева И.В.;
- начальник отдела по научной и инновационной работе, Саркисян Л.Ю.;
- директор технического нефтегазового института, д.э.н., доцент Строкин К.Б.

составили настоящий акт о том, что результаты научных исследований, представленные в диссертационной работе Малюка Владислава Викторовича на тему: «Долговечность конструкционного бетона при морозных и солевых воздействиях (на примере о. Сахалин)» внедрены в учебный процесс кафедры строительства ФГБОУ ВО СахГУ при проведении лекционных и лабораторных занятий для обучения бакалавров направления подготовки 08.03.01 «Строительство» по дисциплинам «Строительные материалы», «Обследование, испытание и реконструкция зданий и сооружений», «Железобетонные и каменные конструкции», «Основы строительных конструкций».

Проректор, к.ю.н., доцент

Хурчак Н. М.

Директор департамента образовательных программ

Дрокина Н.Н.

Начальник отдела программ высшего образования

Краснобаева И.В.

Начальник отдела по научной и инновационной работе

Саркисян Л.Ю.

Директор технического нефтегазового института, д.э.н., доцент

Строкин К.Б.

