

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сахалинский государственный университет», в федеральном государственном бюджетном учреждении «Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации»

Научный руководитель: **Леонович Сергей Николаевич**, доктор технических наук, профессор, иностранный академик РААСН

Официальные оппоненты: **Степанова Валентина Федоровна**, академик МИА, доктор технических наук, профессор, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», заведующий лабораторией коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций

Низина Татьяна Анатольевна, доктор технических наук, профессор, советник РААСН, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва», и.о. директора института архитектуры и строительства, профессор кафедры «Строительные конструкции»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Защита состоится «16» февраля 2024 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.300.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000, Иваново, пр. Шереметевский, 21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета (www.ivgpi.ru).

Автореферат разослан « » января 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Касьяненко Наталья Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. 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. 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.

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. 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». 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), ООО «Сахалинстройинвест» (г. Южно-Сахалинск) и ООО «МИДО» (г. Холмск).

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».

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен литературный обзор работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных современным представлениям о механизмах разрушения бетона при морозных воздействиях, особенностям условий эксплуатации бетона в зоне переменного уровня воды морских портовых сооружений, методам обеспечения и прогнозирования долговечности бетона в этих условиях эксплуатации. Отмечено, что широкий диапазон и большой объем исследований, посвященных изучению долговечности бетона, которые системно проводятся в течение 100 лет, позволил получить большой объем информации о процессах разрушения бетона в условиях морозного воздействия. На этой основе разработаны методы расчета и технологические принципы получения бетона высокой морозостойкости.

Во второй главе представлены экспериментальные методы и методики получения данных, подготовки образцов к исследованию и последующей обработки результатов. Объектами натурных исследований являются бетонные конструкции, подверженные воздействию морской воды и противогололедных химических реагентов зимой в природно-климатических условиях о. Сахалин, построенные за последние 100 лет (1923-2023 гг) на южном побережье острова Сахалин. Методика обследования строилась на основе действующих нормативных документов, которая предусматривала обследование 10 характерных морских портовых сооружений с различным сроком службы (таблица 1, рис. 1, рис. 2).

Программа натурных и экспериментальных исследований построена на изучении системы «материал – конструкция – среда» для подтверждения и развития предложенной концепции о двухстадийности процесса коррозии бетона при морозном воздействии. В соответствии с поставленной целью исследовали: условия эксплуатации бетона в зоне переменного уровня; состояние бетона в зоне переменного уровня по внешним признакам; качественные показатели бетона в конструкциях; температурно-влажностный режим бетона в поверхностной слое конструкций; факторы, влияющих на кинетику разрушения бетона в конструкциях; возможность применения большого объема экспериментальных лабораторных исследований для прогноза долговечности конструкций в реальных условиях; механизмы замораживания и разрушения бетона на различных участках зоны переменного уровня воды; показатели свойств бетона, определяющие стойкость бетона в реальных условиях эксплуатации; технологические факторы, влияющие на долговечность

бетона в конструкциях; факторы, определяющие агрессивность среды для бетона в условиях сильного насыщения и морозного воздействия.

Таблица 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. 1. Общий вид конструкций сооружений: а) волноотбойная стенка из сборных фасонных элементов на объекте К3-2; б) защита корневой части пирса К3-1 гексабитами



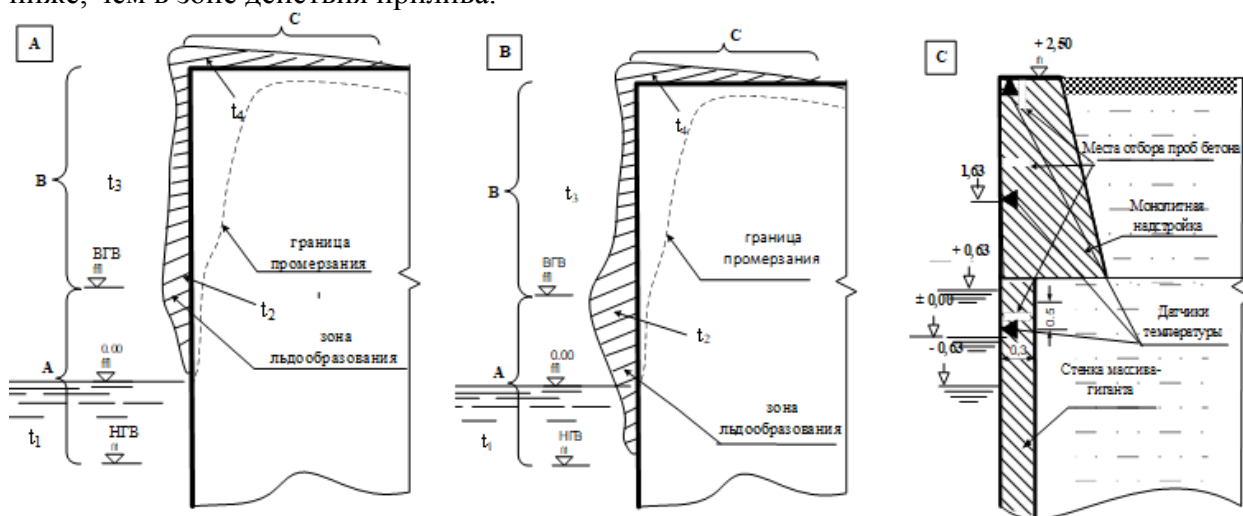
Рис. 2. Общий вид причального сооружения К1 в зимний период (декабрь): а) период отлива; б) период прилива

В лаборатории на пробах из сооружений определяли прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, водопоглощение, пористость, вещественный состав бетона. Непосредственно в конструкциях определяли прочность и водонепроницаемость. Химический анализ материалов проводился стандартными и нестандартными методами, применяемыми при аналогичных исследованиях, для определения агрессивности морской воды к бетону. Пробы бетона, отобранные из сооружения, использовали для исследования

влияния на фазовый состав цементной матрицы морской воды после 90 лет эксплуатации бетона. Для этого применяли наиболее известные методы физико-химического анализа: дифференциальный термогравиметрический анализ (ДТГА); рентгенофазовый полуквантитативный анализ; микрондовый спектральный химический анализ. Глубину проникновения хлорид-ионов определяли по вещественному составу с помощью метода изменения окраски бетона.

В третьей главе исследованы реальные условия эксплуатации бетона в зоне переменного уровня воды морских портовых сооружений. Бетон в зоне переменного уровня подвергается различным механизмам замораживания. Выделены два характерных участка в зоне переменного уровня, отличающиеся механизмами замораживания бетона (рис. 3). Мониторинг температуры бетона на различных участках зоны переменного уровня воды позволил установить параметры морозного воздействия на этих участках (таблица 2).

В зоне действия прилива (рис. 3, участок А) циклическое замораживание и оттаивание бетона происходит только в бетоне выше нулевой отметки в начальный зимний период до середины декабря и в конце зимнего периода. В остальной зимний период, который составляет 60-80 суток, бетон покрыт слоем морского льда толщиной 50-100 см и не подвергается действию циклов замораживания-оттаивания. Температура бетона в период отлива не опускается ниже минус 8 °С при самой минимальной наблюдаемой температуре воздуха минус 20 °С. С повышением температуры воздуха повышается температура замораживания бетона. На участках зоны всплеска волн (участки В и С) бетон подвергается длительному замораживанию при обледенении в течение 80-90 суток. Замораживание бетона происходит при отрицательных температурах на 2-3 °С ниже, чем в зоне действия прилива.



А – участок прямого контакта с морской водой; В и С – участки насыщения бетона от всплеска волны

Рис. 3. Схема разделения зоны переменного уровня воды на участки с учетом водонасыщения и механизма замораживания бетона: А) начало и конец зимнего периода; В) основной зимний период; С) места отбора проб и установки датчиков замера температуры бетона (объект К1)

Таблица 2 – Механизм замораживания бетона и температурные параметры бетона и окружающей среды

| 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) | (-5) ÷ (-10) | (+2.0) ÷ (0.0) | До (-5) | Циклы ЗО |
| | (15.12÷20.02) | Ниже (-10) | (-5) ÷ (-2.0) | (-5) ÷ (-10) | Длительное замораживания |
| 0.00 – НГВ | (15.11÷15.12) (20.02÷10.03) | (-5) ÷ (-10) | (+2.0) ÷ (0.0) | (0,0) | Замораживания не происходит |
| | (15.12÷20.02) | Ниже (-10) | (-0.5) ÷ (-2.0) | До (-9) | Циклы ЗО |

Примечание: Температура бетона на глубине 50 мм от поверхности.

Анализ повреждений конструкций показал, что для объяснения причин разрушения бетона целесообразно их дифференцировать по следующим признакам: глубине поврежденного слоя (поверхностное и объемное); масштабу повреждения конструкции (локальное и глобальное); кинетике процесса разрушения (внезапное и деградационное).

Дифференцирование по масштабу повреждения конструкции позволяет оценивать обоснованность принятых решений по технологии на этапе проектирования и строительства. Локальный характер повреждения конструкций свидетельствует о нестабильности технологического процесса на этапе строительства и не оказывает влияние на основные эксплуатационные показатели конструкции. Глобальный характер разрушения свидетельствует о принципиальных недостатках в проектировании мер защиты или в технологии бетонных работ из-за низкого качества реализации проектных решений по долговечности на этапе строительства. Этот вид разрушения может затрагивать все конструкции сооружения или отдельную конструкцию.

Результаты обследований конструкций по внешним признакам с учетом принятой дифференциации разрушений бетона позволили выделить следующие виды разрушений: $R_{П}$ – поверхностное (локальное и глобальное) разрушение до обнажения крупного заполнителя; $R_{В}$ – объемное локальное разрушение; $R_{С1}$ – отслоение поверхностного слоя от слабого внутреннего подстилающего слоя бетона на участках обледенения; $R_{С2}$ – поверхностное (глобальное или локальное) разрушение бетона на участках обледенения конструкций с отслоением поверхностного слоя из-за разрушения внутреннего слоя; $R_{Т}$ – растрескивание бетона с последующим разрушением на куски.

Деление зоны переменного уровня на участки по условиям внешних воздействий (рис. 3) и классификация разрушений по видам позволили в результате визуального обследования сооружений определить участки конструкций с преобладающими видами разрушений в сооружениях (таблица 3).

Таблица 3 – Вид и характер разрушений бетона в зоне переменного уровня портовых сооружений

| Шифр сооружения | Вид и характер разрушений бетона на различных участках зоны переменного уровня воды | | |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| | Участок А | Участок В | Участок С |
| К1 | $R_{П}$ (Л) $R_{В}$ (Л) | Механические повреждения | Механические повреждения |
| Х2-1 | $R_{П}$ (Л) | $R_{В}$ (Л) $R_{П}$ (Л) $R_{С2}$ (Л) $R_{Т}$ (Л) | $R_{В}$ (Л) $R_{П}$ (Л) $R_{С2}$ (Л) $R_{Т}$ (Л) |
| Х2-2 | Разрушения отсутствуют | Разрушения отсутствуют | Разрушения отсутствуют |
| К2 | $R_{С2}$ (Л) | $R_{В}$ (Л) $R_{П}$ (Л) $R_{С2}$ (Л) | $R_{В}$ (Л) $R_{П}$ (Л) $R_{С2}$ (Л) |
| К3-1 | Разрушения отсутствуют | $R_{С1}$ (Л) | $R_{С1}$ (Л) |
| К3-2 | Разрушения отсутствуют | Разрушения отсутствуют | Разрушения отсутствуют |
| У3 | Разрушения отсутствуют | $R_{С1}$ (Г) | $R_{С1}$ (Г) |
| Н3 | - | Разрушения отсутствуют | $R_{В}$ (Л) |
| К3-2 | - | $R_{С1}$ (Г) | $R_{С1}$ (Г) |
| К3-3 | Разрушения отсутствуют | Разрушения отсутствуют | Разрушения отсутствуют |
| Х3-3 | Разрушения отсутствуют | $R_{П}$ (Л) | $R_{П}$ (Л) |

Примечания: Индекс сооружения соответствует данным таблице 1; 2) Зона переменного уровня разделена на участки А, В, С в соответствии с рис. 3; 4) характер разрушения: Л – локальный, Г – глобальный.

На современном этапе строительства (2000-2023 гг.) характерно разрушения бетона вида $R_{С2}$ на участках конструкций с длительным обледенением (участки В и С), т.е. где отсутствуют циклы замораживание и оттаивания. Как правило, это происходит после первого зимнего сезона. Бетон не имеет прямого контакта с морской водой и отсутствует многократное замораживание и оттаивание бетона. Лавинообразный и глобальный характер разрушений бетона вида $R_{С2}$ свидетельствует об агрессивности фактора длительности морозного воздействия без перехода отрицательной температуры через

ноль. Скоротечный и лавинный характер разрушения не позволяет его отнести к деградационному виду, поскольку этот термин предполагает продолжительный процесс снижения показателей качества бетона. В соответствии с технической терминологией его можно характеризовать как *внезапный отказ*. Разрушение конструкций после первого зимнего периода при длительном замораживании бетона в воде становится характерным явлением. Длительность воздействия отрицательных температур на бетон в состоянии обледенения является характерным условием эксплуатации сооружений на морском побережье о. Сахалин. Поэтому процесс коррозии бетона целесообразно классифицировать по кинетике, выделяя *деградационный и внезапный отказ*. Это позволит объективно оценивать причины повреждения бетона, набирать статистику и разрабатывать технологические регламенты бетонных работ с учетом преобладающего вида морозного воздействия в условиях строительной площадки.

Результаты исследований образцов бетона из конструкций, приведенные в таблице 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.

Из данных таблицы 4 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 сооружений 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.

Таблица 4 – Показатели качества бетона в сооружениях

| Индекс сооружения и конструкции | Срок эксплуатации, год | Прочность при сжатии, МПа | | Морозостойкость F ₂ , циклы | Водонепроницаемость, МПа | |
|---------------------------------|------------------------|---------------------------|----------------|----------------------------------------|--------------------------|----------------|
| | | R ₁ | R ₂ | | W ₁ | W ₂ |
| К1 | > 90 | | | | | |
| Секция 1: | | | | | | |
| Участок А-1 | | 56,9 | 57,3 | 20-50 | - | - |
| Участок В-1 | | 52,3 | | то же | < 0,2 | - |
| Участок С-1 | | 58,9 | | то же | - | - |
| Секция 2: | | | | | | |
| Участок А-2 | | 62,1 | 62,7 | 20-50 | - | 22 |
| Участок В-2 | | 59,6 | | то же | - | |
| Участок С-2 | | 58,3 | | то же | < 0,2 | |
| Секция 3: | | | | | | |
| Участок А-3 | 57,6 | 55,4 | 20-50 | < 0,2 | 22 | |
| Участок В-3 | 48,9 | | то же | - | | |
| Участок С-3 | 55,4 | | то же | - | | |
| К3-1 (участок С): | 7 | | | | | |
| Секция 3 | | 36,9 | 56,0 | 300 | - | - |
| Секция 4 | | 40,9 | 51,2 | 300 | - | - |
| К3-2 (участок С): | 1 | | | | | |
| Секция 1 | | 35,4 | 32,1 | 150 | < 0,4 | |
| Секция 2 | | 34,9 | 32,0 | 200 | < 0,4 | |
| Секция 3 | | 33,8 | 32,7 | 100 | < 0,4 | |
| Секция 4 | | 26,9 | 29,3 | 150 | < 0,4 | |

Примечания: Прочность бетона R₁ и R₂ определялась соответственно по методикам в ГОСТ 28570 (испытание образцов-цилиндров) и ГОСТ 22690 (отрыв со скалыванием). Водонепроницаемость бетона W₁; W₂ по методикам в ГОСТ 12730.5 по мокрому пятну и по воздухопроницаемости прибором ВИП-1.3.

Экспериментальные данные показывают, что циклы ЗО являются определяющим критическим показателем суровости внешних воздействий в зоне переменного уровня воды для обычного бетона с В/Ц $\geq 0,5$ 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.

Выполнены исследования морозостойкости бетонов с воздухововлекающими добавками, составы которых рекомендованы СП 28.13330.2017 и ГОСТ 31384-2017. 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. Составы и показатели качества бетонов приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Составы и показатели качества бетона

| № состава | В/Ц | Ц, кг ³ | Вид добавки (содержание в % от массы цемента) | Показатели бетонной смеси | | Прочность на 28 суток R ₀ , МПа |
|-----------|------|--------------------|--------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------------------|
| | | | | ОК, см | V _{В.В.} , % | |
| 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 |

Сравнительные исследования морозостойкости бетонов различных составов показывают, что ограничения, установленные СП 28.13330.2017 и ГОСТ 31384-2017, для долговечности в агрессивных средах класса XF4 позволяют обеспечить требуемую марку по морозостойкости не менее F₂300, которая рекомендована для климатических условий с расчетной температурой воздуха ниже -20 °С.

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/м³. Составы бетонов приведены в таблице 6, результаты показаны на рис. 4.

Таблица 6 – Составы и показатели качества бетона

| № состава бетона | В/Ц | Вид добавки и содержание (% от массы цемента) | Показатели бетонной смеси | | Показатели бетона | | |
|------------------|------|-----------------------------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|----------------|-----|
| | | | ОК | V _{В.В.} | R ₀ | F ₂ | 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_{В.В.} – воздухововлечение смеси, %; R₀ – предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток, МПа; F₂ – марка морозостойкости по ГОСТ 10060, испытание ускоренным методом; W – марка по водонепроницаемости.

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 6), показатели качества которого рекомендованы для эксплуатации в агрессивных средах класса XF4 с долговечностью 50 лет, имеет марку по морозостойкости более F₂600. 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_F 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.

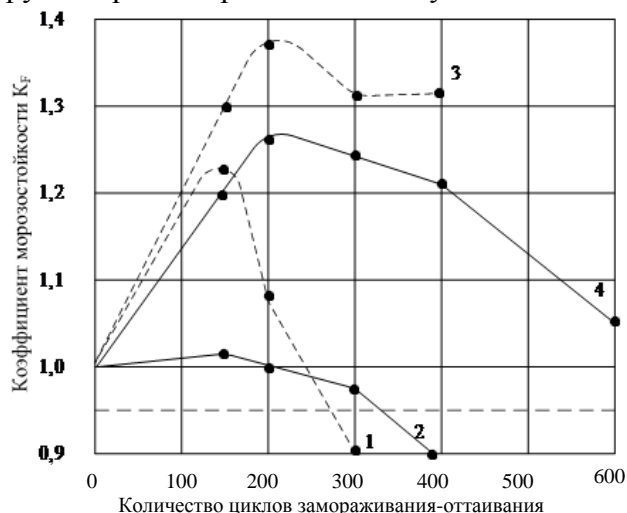


Рис. 4. Зависимость морозостойкости бетона от воздухо содержания бетонной смеси (испытание по второму базовому методу ГОСТ 10060). Цифрами обозначены составы бетона по таблице 6

нического сооружения. Приняв за основу «характер» развития динамики температурных полей в пластине в соответствии с рис. 3, покажем на рис. 5 развитие картины температурных профилей во времени процесса. Железобетонное сооружение представляется в виде неограниченной пластины размером L . Полагаем, что бетон насыщен влагой. Полагаем, что в начальный момент времени, принимаемый как $\tau = \tau_0$, распределение температур в бетоне и грунте может быть обозначено как:

$$T_b(x, \tau)|_{\tau=0} = T_{2m}(x, \tau)|_{\tau=0} = T_0. \quad (1)$$

Здесь: T_b — температура бетона; T_{2m} — температура грунтового массива; T_0 — начальное значение температуры; x — координата, м; τ — время, с.

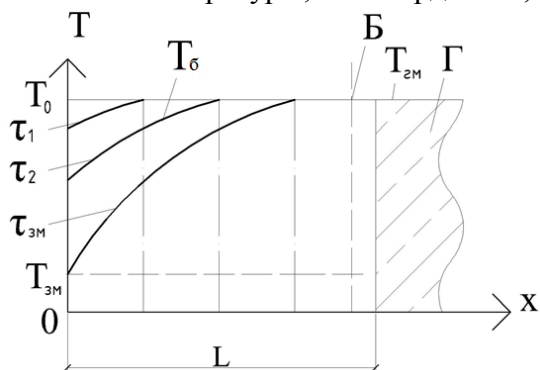


Рис. 5. Профили температур в системе «бетон – грунт» на ранней стадии охлаждения: Б – бетон, Г – грунт

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 $T_{пов} = f(\tau)$.

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

Краевая задача нестационарной теплопроводности запишется в виде:

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

$$T_2(x, \tau)|_{\tau=0} = T_0(x), \quad (3)$$

$$T_2(x, \tau)|_{x=0} = T_{xl}(\tau), \quad (4)$$

$$T_2(x, \tau)|_{x=L} = T_0. \quad (5)$$

Для удобства проведения математических выкладок и последующего численного анализа приведем задачу (2)-(5) к безразмерному виду, обозначив:

$$\bar{x} = \frac{x}{L}; \quad Fo_2 = \frac{a_2 \tau}{L^2}; \quad a_2 = \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_2}; \quad (6)$$

$$\theta_2(\bar{x}, Fo_2) = \frac{T_2(x, \tau) - T_{xl}}{T_0 - T_{xl}}. \quad (7)$$

С учетом этих подстановок уравнения (2)-(5) приводятся к виду:

$$\frac{\partial \theta_2(\bar{x}, Fo_2)}{\partial Fo_2} = \frac{\partial^2 \theta_2(\bar{x}, Fo_2)}{\partial \bar{x}^2}. \quad (8)$$

$$\theta_2(\bar{x}, Fo_2)|_{Fo_2=0} = \theta_0(\bar{x}). \quad (9)$$

$$\theta_2(\bar{x}, Fo_2)|_{\bar{x}=0} = \frac{T_2(x, \tau)|_{x=0} - T_{xl}}{T_0 - T_{xl}} = 0. \quad (10)$$

$$\theta_2(\bar{x}, Fo_2)|_{\bar{x}=1} = \frac{T_2(x, \tau)|_{x=L} - T_{xl}}{T_0 - T_{xl}} = 1. \quad (11)$$

Решение краевой задачи (8)-(11) проводилось методом интегрального преобразования Лапласа:

$$\begin{aligned} \theta_2(\bar{x}, Fo_2) = & \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin(\pi n \bar{x}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_2) \\ & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\pi n \bar{x}) \int_0^1 \theta_0(\xi) \cdot \sin(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_2). \end{aligned} \quad (12)$$

При дальнейшем понижении температуры воздуха, а, следовательно, и поверхности до величины $T_{нп}$, на поверхности конструкции образуется слой промерзания толщиной ξ , размер которого постоянно возрастает, а граница замерзания начинает продвигаться внутрь конструкции, как это показано на рис. 6.

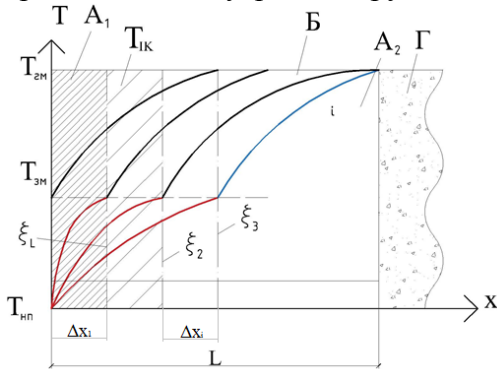


Рис. 6. Профили температур в системе «бетон – грунт»: $T_{к}$ – профиль температур при $\tau = \tau_{к}$

Для задачи теплопроводности в замерзшей зоне можно записать:

$$\begin{aligned} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} &= \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1(x, \tau)}{\partial x^1}; \\ \tau > \tau_{к}; \quad 0 \leq x \leq \xi(\tau). \end{aligned} \quad (13)$$

В безразмерном виде задача имеет вид:

$$\frac{\partial \theta_1(\bar{x}_1, Fo_1)}{\partial Fo_1} = \frac{\partial^2 \theta_1(\bar{x}_1, Fo_1)}{\partial \bar{x}_1^2}; \quad Fo_1 \geq 0; \quad 0 \leq \bar{x}_1 \leq 1 \quad (0 \leq \bar{x}_1 \leq \xi); \quad (14)$$

$$\theta_1(\bar{x}_1, Fo_1)|_{Fo_1=0} = \theta_{1.0}(\bar{x}_1), \quad (15)$$

$$\theta_1(\bar{x}_1, Fo_1)|_{\bar{x}_1=0} = 1, \quad (16)$$

$$\theta_1(\bar{x}_1, Fo_1)|_{\bar{x}_1=1} = 0. \quad (17)$$

В месте контакта пластин предполагается равенство температур и равенство тепловых потоков:

$$K_{т}^* \cdot \theta_1(\bar{x}_1, Fo_1)|_{\bar{x}_1=\xi^*} = \theta_2(\bar{x}_2, Fo_2)|_{\bar{x}_2=\xi^*} - 1, \quad (18)$$

$$-\frac{\partial \theta_2(\bar{x}_2, Fo_2)}{\partial \bar{x}_2} = Ki_1^*(Fo_1) \cdot K_{\lambda} \cdot K_{т}^* + Ko_2^* \frac{d\xi^*(Fo_2)}{dFo_2}. \quad (19)$$

Здесь для краткости записи обозначены модифицированный критерий Кирпичева, который характеризует отношение потока теплоты, подводимой к поверхности (границе раздела), к потоку теплоты, отводимой внутрь тела:

$$Ki_1^* = \frac{q_1(\tau) \cdot (L - \xi)}{\lambda_1 \cdot (T_{нп} - T_{3м})}; \quad (20)$$

и модифицированный критерий Коссовича, отражающий зависимость между количеством теплоты, затрачиваемой на фазовый переход «замерзание – оттаивание» и на нагревание (охлаждение) влажного тела:

$$Ko_2^* = \frac{r^* w}{c_2 \cdot (T_{3м} - T_{гм})}. \quad (21)$$

Результаты расчетов по разработанным математическим моделям процессов теплопереноса позволили найти формулу для скорости продвижения границы зон. Для зоны мерзлого слоя получено следующее выражение:

$$\xi^*(Fo_2) = 0,568(Fo_2)^{0,234}. \quad (22)$$

Для стадии оттаивания получено следующее выражение:

$$\xi^*(Fo_3) = 0,082(Fo_3)^{-0,793}. \quad (23)$$

Разумеется, приведенный математический анализ 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.

Пятая глава посвящена установлению критериев долговечности бетона в условиях многоциклического замораживания и оттаивания и для случая длительного замораживания. Характер и объем разрушений бетона в зоне переменного уровня воды дает основание считать, что совершенствование технологии бетонных работ для конструкций в условиях агрессивной среды класса XF4 целесообразно строить на основе реальной работы бетона в сооружении при морозном воздействии.

Результаты исследований показали, что суровость внешних воздействий в зоне переменного уровня воды необходимо оценивать следующими показателями: числом циклов замораживания и оттаивания (N_{FT}); температурой замораживания (t_F); продолжительностью замораживания (T_F).

Установлено, что процессы морозной коррозии бетонных конструкций в агрессивной среде класса XF4 соответствуют общепринятым теоретическим положениям о механизмах морозного разрушения. Долговечность бетона при морозном воздействии определяется значением минимальной отрицательной температуры бетона в конструкции и степенью водонасыщения пор. При этом насыщение пор во многом определяется механизмом замораживания бетона. Долговечность бетона в зоне переменного уровня воды в ранний период структурообразования в значительной степени зависит от механизма замораживания бетона.

В качестве рабочей гипотезы принято, что при механизме замораживания бетона вида P_{F1} процесс разрушения определяет механизм гидравлического давления воды, при механизме замораживания бетона вида P_{F2} – механизм кристаллизационного давления льда.

Эффективность работы основных показателей долговечности бетона: В/Ц отношение, расход цемента (Ц), определяется условиями твердения бетона, т.е. степенью гидратации цемента (a). Отсутствие обоснованных требований к режиму твердения бетона является основной причиной разрушения бетона в агрессивных средах класса XF4 на ранних этапах эксплуатации. Поэтому на практике получают как «вечные», так и бетоны с «внезапным» отказом.

Современные теоретические положения структурной теории цементных бетонов, общепринятые гипотезы о механизмах разрушения бетона в условиях морозного воздействия и результаты исследования условий работы бетона в конструкциях позволили сформулировать концепцию долговечности бетона для двух сценариев морозного воздействия: а) преобладающим фактором являются циклы замораживания-оттаивания при замораживании бетона на воздухе; б) преобладающим фактором является длительность воздействия отрицательной температуры при замораживании бетона в минерализованной воде.

Сценарий А применим для бетона зоны прилива морских портовых сооружений в дальневосточных морях (рис. 3, участок А), где преобладает механизм замораживания вида P_{F1} . Определяющим фактором морозостойкости бетона в этом случае является наличие дискретной системы капиллярных пор к началу морозного воздействия.

Формирование системы капиллярных пор зависит как от возраста T_f , так и от среднесуточной температуры твердения бетона t_f , поэтому мы можем качество структуры пор или «зрелость структуры» пор с точки зрения морозостойкости оценивать функцией:

$$S_F = \frac{T_f \cdot t_f}{n_p}, \quad (24)$$

где: n_p – коэффициент, характеризующий значимость влажности для формирования структуры пор.

В таблице 7 приведены расчетные значения критической зрелости S_a в зависимости от В/Ц отношения.

Таблица 7 – Параметры критической зрелости структуры бетона по данным и коэффициент зрелости структуры бетона в 28 суток в нормальных условиях твердения

| В/Ц | Время твердения T_f для формирования дискретной системы пор, сутки | Критическая зрелость структуры S_a , °C×сутки | Коэффициент зрелости структуры бетона, $N_{28} = S_{28}/S_a$ |
|------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 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 |

Примечание: S_{28} – зрелость структуры бетона при: $T_f = 28$ сут; $t_f = 15$ °C ($S_{28} = 15 \times 28 = 420$ °C×сутки).

В таблице 8 приведены результаты экспериментальных исследований в зависимости от значений изучаемых параметров.

Таблица 8 – Долговечность бетона конструкции при различных параметрах режима твердения

| D_{BT} , годы | В/Ц | Ц, кг/м ³ | $V_{кр}$, л/м ³ | $T_{ут}$, сутки | $V_{ВВ}$, % |
|-----------------|-----|----------------------|-----------------------------|------------------|--------------|
| 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: D_{BT} – срок службы бетона, годы; В/Ц – водоцементное отношение, безразмерная величина; $V_{кр}$ – критическое водосодержание бетонной смеси, л/м³; $T_{ут}$ – продолжительность твердения при температуре 18 °C и влажности не менее 95 %; $V_{ВВ}$ – воздухосодержание бетонной смеси, %.

Поскольку в данном случае величины $V_{кр}$ и $V_{ВВ}$ не менялись, математической обработке подверглись только оставшиеся величины. В результате получено следующее выражение:

$$D_{BT} = 14,8(V/Ц)^{0,33}(Ц)^{0,26}(T_{ут})^{-0,045} \quad (25)$$

Дискретность системы капиллярных пор в бетоне является одним из условий обеспечения его стойкости к морозному воздействию, поскольку это препятствует влагообмену с внешней средой.

Показатель критической зрелости структуры бетона S_a позволяет оценивать эффективность использования в бетоне параметров В/Ц и Ц и определять продолжительность влажностного ухода $T_{ТР}$, необходимую для создания долговечной структуры бетона в зоне прилива, т.е. в условиях, где преобладает морозная нагрузка вида P_{F1} .

$$T_{ТР} = S_{cr}/t_f, \quad (26)$$

где: S_{cr} – критическая зрелость структуры бетона.

Представленная концепция критической зрелости структуры бетона имеет практическое значение, поскольку на этапе строительства позволяет контролировать уровень соответствия бетона проектным требованиям.

В научном плане применение концепции критической зрелости структуры бетона позволяет сравнивать бетоны разных составов по «коэффициенту структурной зрелости бетона» N_F :

$$N_F = S_f/S_a, \quad (27)$$

где: S_f – фактическая зрелость структуры бетона.

Коэффициент структурной зрелости N_F позволяет объективно, а не субъективно проводить оценку соответствия на этапе приемки конструкций, поскольку этот показатель

можно инструментально определить в условиях строительной площадки с помощью простых технически средств измерения и контроля. Безусловно, это можно выполнять при условии влажностного твердения бетона, т.е. когда коэффициент $n_p = 1$.

Сценарий Б применим для бетонных конструкций зоны всплеска волны (рис. 3, участки В и С) морских портовых сооружений и конструкций, подверженных воздействию противогололедных материалов, где преобладает механизм замораживания бетона вида R_{F2} . В условиях длительного замораживания с обледенением 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. В этом случае при расчете состава бетона необходимо ограничивать водосодержание в бетонной смеси, т.к. этот показатель к началу морозного воздействия будет определять объем свободной воды в бетоне, способной к миграции при градиенте температур. Поэтому, во-первых, необходимо обеспечить «критическую зрелость структуры» бетона (S_{cr}), во-вторых, создать условия, которые позволят связать за счет процесса гидратации цемента свободную воду и ограничить ее перемещение в структуре пор при температурном градиенте. Анализ факторов, влияющих на стойкость бетона в условиях морозного воздействия, показывает, что существует «критическое» содержание воды ($V_{кр}$) в бетонной смеси, превышение которого резко сокращает долговечность бетона. Проектирование долговечности бетона для этих условий необходимо выполнять с учетом ограничения по содержанию воды в бетонной смеси. Традиционные подходы к исследованию стойкости бетона в условиях, когда механизм замораживания определяет циклы замораживания и оттаивания не позволяют объективно оценить роль водосодержания бетонной смеси к началу морозного воздействия.

Исходя из накопленного опыта для условий, когда конструкции подвергаются длительному замораживанию с обледенением, целесообразно ограничивать применение бетонных смесей с ОК более 10 см и расходом воды более 175 л/м^3 .

Исследования показали, что у обычного (традиционного) бетона имеются значительные резервы. Эффективность применения воздухововлекающих добавок для повышения морозостойкости подтверждена лабораторными и натурными исследованиями бетона. Однако вопрос оптимального содержания искусственно вовлеченного воздуха в бетоне на данный период не решен. Недостаточная изученность роли искусственного воздухововлечения для морозостойкости бетона проявляется в том, что нормативные требования к воздухововлечению существенно различаются. Это ставит перед производителями бетонной смеси и строителями сложную задачу особенно, когда заказчик устанавливает требования к параметрам воздухововлечения при доставке бетонной смеси на удаленные строительные объекты. Исследований с участием автора в условиях строительной площадки (таблица 9) показали, что для обеспечения требуемых технологических свойств бетон необходима специальная длительная подготовка, которую в условиях строительной площадки трудно обеспечить.

Таблица 9 – Сравнительные показатели качества бетонной смеси и бетона на БСУ и объекте (40 контрольных испытаний)

| 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 |

Технологический прием, позволяющий обеспечить достаточное содержание в цементном камне резервных пор при одновременной минимизации объема капиллярных пор и длительное сохранение в жидкой фазе веществ, понижающих температуру льдообразования, может существенно повысить долговечность бетона в зоне переменного уровня воды.

Вопрос выбора оптимальной технологии бетонных работ является актуальным при переходе проектирования долговечности по эксплуатационным характеристикам. Отсутствие практических расчетных методов, основанных на зависимости морозостойкости бетона от воздухововлечения не позволяет принимать оптимальные экономические решения по составам и технологии бетона.

Для проектирования и прогнозирования долговечности бетона в агрессивных средах класса XF4 на основе теоретических положений и результатов проведенных исследований предложена концепция, основанная на положении о двухстадийности процесса морозной коррозии: *стадия инициации* – последующая гидратация цемента и повышение за счет этого свойств бетона; *стадия деградации* – образование в структуре бетона системы микротрещин, которая приводит к снижению свойств бетона.

Кинетика этих процессов зависит от интегральной нагрузки на структуру бетона R_S , которая зависит от параметров механизмов замораживания бетона: P_{F1} или P_{F2} , и степени насыщения пор S_{ACT} :

$$R_S = f(S_{ACT}, P_F). \quad (28)$$

Интегральная нагрузка от внешних воздействий R_S достигает предельного значения R_{CR} при условии критического водонасыщения ($S_{ACT} > S_{CR}$). Это является причиной образования в структуре бетона новой системы пор, которые представлены микротрещинами.

Двухстадийная концепция процесса морозной коррозии бетона (рис. 7) позволяет проектирование и прогнозирование долговечности бетона выполнять **из условия долговечности и работоспособности** с учетом реальных условий эксплуатации. Основные положения концепции имеют практическое подтверждение и могут использоваться для разработки расчетной модели прогноза срока службы конструкций в условиях морозного воздействия. Концепция позволяет прогнозировать срок службы конструкций по трем сценариям.



Рис. 7. Сценарии жизненного цикла бетона при морозном воздействии на основе натуральных исследований

Обоснование продолжительности ЖЦ на этапе эксплуатации, который оценивается сроком службы конструкции T_C , выполняется на этапе проектирования и может назначаться исходя из технических, финансовых, экологических и социальных аспектов. В нашей работе, рассматривается технический аспект долговечности, поэтому сроком службы конструкции T_C зависит от требований к ее эксплуатационной пригодности. Эксплуатационную пригодность конструкции можно оценивать категорией технического состояния.

Жизненный цикл (ЖЦ) бетона без ограничения срока эксплуатации визуально представлен в виде кривой (1) на схеме рис. 7. Это характерно для бетона свойства, которого соответствуют условиям эксплуатации. Бетон не имеет стадии деградации ($T_{др}$), поскольку в эксплуатационный период обеспечивается условие $R_S \leq R_{CR}$. В реальных условиях кинетика прочности долговечного бетона имеет только возрастающий характер, т.е. бетон не только

способен сохранить прочностные показатели, но и увеличить их. Наличие у бетона в ЖЦ только стадии ($T_{ин}$) подтверждают результаты натуральных исследований.

Предлагаемая концепция оценки жизненного цикла бетона в период эксплуатации позволяет перейти к исследованию факторов, определяющих кинетику развития процессов в структуре бетона на стадии инициации и деградации. Это можно рассматривать как начальный этап разработки модели прогноза для проектирования конструкций по долговечности и эксплуатационным характеристикам (работоспособности).

Процесс коррозии бетона на основании результатов исследований можно представить не только качественно, но и оценить количественно. Установлено, что по кинетике прочности бетона в конструкции можно определять стадию коррозионного процесса. Стадия инициации определяется условием (29), а стадия деградации – условием (30):

$$R_0 = R_N, \quad (29)$$

$$R_0 < R_N, \quad (30)$$

где: R_0 – фактическая прочность бетона в сооружении, МПа; R_N – расчетная прочность бетона, МПа.

Продолжительность стадии деградации определяется функциональным назначением конструкции в сооружении: для массивных бетонных конструкций можно допускать поверхностное разрушение и это нельзя допускать для железобетонных конструкций.

Одним из важных вопросов в проблеме долговечности бетона при морозном воздействии – отсутствие оперативных методов определения показателей качества бетона по долговечности на этапе строительства. Фактически в эксплуатацию принимаются конструкции без оценки соответствия. Это не позволяет объективно оценивать эффективность предлагаемых подходов к совершенствованию технологии бетонных работ, поскольку совершенствовать технологию возможно при условии ее оценки. Приемка конструкции в эксплуатацию по показателю «критической зрелости структуры» бетона S_{cr} и температурных условий твердения позволяет оценивать качество реализации проектных решений на этапе строительства для обеспечения долговечности конструкций морских сооружений в зоне действия прилива.

Исходя из этих требований, разработана блок-схема алгоритма проектирования и контроля показателей долговечности на этапе строительства (рис. 8).

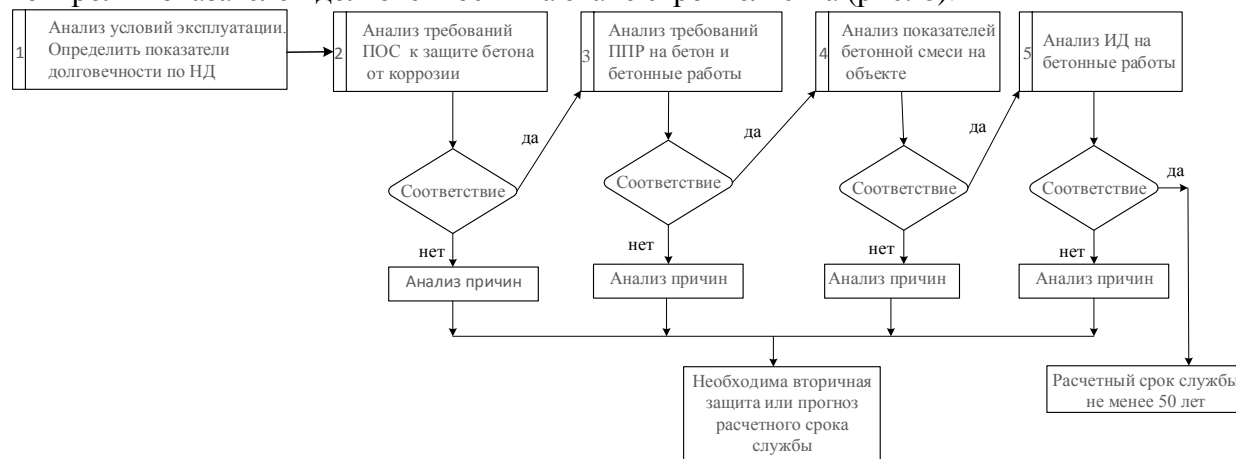


Рис. 8. Алгоритм принятия решения при оценке соответствия бетонных конструкций требованиям долговечности в агрессивных условиях класса XF4

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 оценки соответствия на этапе приемки конструкций в эксплуатацию, автор предложил 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.

В заключении указаны основные выводы по результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований:

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/м³.

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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящий в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. **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.

2. Поведение конструкционного бетона при высокой температуре: карбонизация, декарбонизация и рекарбонизация / С.Н. Леонович, F. Chao, J. Miao, L. Junwei, **В.В. Малюк**, Е.Е. Шалый, Д.А. Литвиновский, А.В. Колодей, А.В. Степанова // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2023. – № 2 (55). – С. 73-85.

3. **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.

4. 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.

5. Метод оценки долговечности бетона морских сооружений на этапе строительства / **В.В. Малюк**, В.Д. Малюк, С.В. Вавренюк, С.Н. Леонович // Строительные материалы. – 2023. – № 10 (818). – С. 25-28.

Статьи в изданиях, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus

6. **Malyuk, V.V.** Longevity of Concrete Maritime Structures in Harsh Service Environment / **V.V. Malyuk** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079. – Chapter 1. – Article no. 022017.

7. **Malyuk, V.V.** Freezing mechanisms of the concrete in an area of variable water level of port facilities / **V.V. Malyuk, V.D. Malyuk** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 988. – Chapter 4. – Article no. 052020.

8. **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.

Монография

9. **Малюк, В.В.** Долговечность конструкционного бетона при морозных и солевых воздействиях: мониторинг, испытания, рекомендации / **В.В. Малюк**, В.Д. Малюк, С.Н. Леонович. – М.: ИНФРА-М, 2023. – 226 с.

Другие публикации:

10. **Малюк, В.В.** Морские гидротехнические сооружения: деградационный и внезапный отказ конструкционного бетона / **В.В. Малюк**, С.Н. Леонович, Н.А. Будревич // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: сборник научных статей XXI Международного научно-методического семинара. – Брест: БрГТУ, 2018. – Часть 1. – С. 328-333.

11. **Малюк, В.В.** Прогноз долговечности морских берегозащитных сооружений / **В.В. Малюк**, С.Н. Леонович, Н.А. Будревич // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: сборник научных статей XXI Международного научно-методического семинара. – Брест: БрГТУ, 2018. – Часть 1. – С. 334–337.

12. **Малюк, В.В.** Морозостойкость бетона при различных методах испытаний / **В.В. Малюк** // Проблемы современного строительства: материалы Международной научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 246-256.

13. **Малюк, В.В.** Проектирование бетонных конструкций по долговечности для агрессивных сред класса XF 4 / **В.В. Малюк**, В.Д. Малюк, С.Н. Леонович // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: материалы IX-ой международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика РААСН Чернышова Е.М. – Тамбов, Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2022. – С. 189-194.

14. **Малюк, В.В.** Характерные причины разрушения бетона в зоне переменного уровня воды / **В.В. Малюк**, В.Д. Малюк, С.Н. Леонович // Проблемы современного строительства: материалы Международной научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 306-319.

15. Влияние комбинированных режимов карбонизации и хлористости на скорость проникновения и перераспределения хлоридов в бетонах: анализ экспериментальных исследований / С.Н. Леонович, Е.Е. Шалый, Д.А. Литвиновский, А.В. Степанова, А.В. Журавская, **В.В. Малюк** // Проблемы современного строительства: материалы Международной научно-практической конференции. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 196-225.

16. **Малюк, В.В.** Концепция модели морозного воздействия на конструкционный бетон при сильном насыщении морской водой / **В.В. Малюк** // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тезисы докладов VIII-го международного симпозиума. – Тамбов, Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2023. – С. 70-73.