

Научная статья
УДК 620.193.4
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/117-142>

Обоснование к разработке методологии информационного моделирования срока службы конструкций морских гидротехнических сооружений по долговечности бетона защитного слоя арматуры

Кирилл Игоревич Патлай✉, Владимир Григорьевич Цуприк

Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация
✉ patlai.ki@dvfu.ru

Аннотация. Приведённые в статье результаты натурных обследований технического состояния бетонных поверхностей железобетонных элементов причалов морских портов указывают на неэффективность нормативно-правовой базы для количественного описания длительности жизненного цикла морских сооружений с учётом деструкции бетонных поверхностей. Основной темой исследования является совершенствование концепции моделирования расчёта срока службы поверхностей железобетонных элементов морских причалов по долговечности бетона защитного слоя в агрессивной морской среде. Обозначены предпосылки для научного обоснования методологии имитационного моделирования жизненного цикла железобетонных элементов конструкций сооружений по критерию отслоения бетона защитного слоя арматуры при её коррозии.

Ключевые слова: гидротехническое строительство, причалы, срок службы, нормирование, долговечность бетона, деструкция бетона, коррозия арматуры

Для цитирования: Патлай К.И., Цуприк В.Г. Обоснование к разработке методологии информационного моделирования срока службы конструкций морских гидротехнических сооружений по долговечности бетона защитного слоя арматуры // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 117–142.

Original article

Substantiation of the methodology development for information modeling the service life of offshore hydraulic structures based the concrete durability of protective layer of reinforcement

Kirill I. Patlay✉, Vladimir G. Tsuprik

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation
✉ patlai.ki@dvfu.ru

Abstract. The results of field surveys of the technical condition of concrete surfaces of reinforced concrete elements of seaports berths presented in the article indicate the inefficiency of the regulatory framework for quantifying the life cycle of marine structures, taking into account the destruction of concrete surfaces. The main topic of the research is to improve the concept of modeling the durability of the surfaces of reinforced concrete elements of marine berths according to the criterion of concrete detachment of the reinforcement protective layer. The prerequisites for the scientific substantiation of the methodology of simulation modeling

of the life cycle of reinforced concrete structural elements of structures under the conditions of durability of concrete in an aggressive marine environment are outlined.

Keywords: hydraulic engineering, berths, service life, rationing, durability of concrete, destruction of concrete, corrosion of reinforcement

For citation: Patlay K.I, Tsuprik V.G. Substantiation of the methodology development for information modeling the service life of offshore hydraulic structures based the concrete durability of protective layer of reinforcement. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 117–142. (In Russ.).

Введение

Актуальность создания *методологии¹ нормативного расчёта долговечности железобетонных* (далее – ж/б) элементов конструкций морских причальных сооружений, работающих в агрессивных условиях замерзающих морей, для нашей страны была и остаётся достаточно высокой и в настоящее время, и в будущем. Основным источником высокой актуальности проблемы долговечности морских гидротехнических сооружений (далее – МГТС) является необходимость существенного наращивания суммарной мощности морских портов Дальневосточного, Арктического и Балтийского бассейнов, в том числе за счёт строительства новых и реконструкции существующих объектов причального фронта на трассе Северного морского пути (СМП). Согласно «Плану развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 года»², утверждённому решением Правительства РФ, в развитие Федерального закона от 08.11.2007 г. № 261-ФЗ «О морских портах в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [1] запланировано до 2035 года строительство 12 портовых терминалов и модернизация 2 существующих. Но при этом утверждённый Правительством «План развития инфраструктуры СМП...» предусматривает ежегодную актуализацию потребности в развитии государственной портовой инфраструктуры в акватории СМП в соответствии с планами добывающих компаний до декабря 2035 г.

Реальные условия строительства и эксплуатации МГТС, основу которых составляют, прежде всего, причальные конструкции перегрузочных комплексов, в суровых климатических условиях, преимущественно в морях Тихого и Северного Ледовитого океанов, требуют гарантированного обеспечения показателей надёжности и долговечности их конструкций. На протяжении многих десятилетий отечественные и зарубежные авторы этим вопросам посвятили большое число работ, которые можно подразделить на работы по *обследованию технического состояния* морских гидротехнических сооружений, по подбору ингредиентов и *составам гидротехнических бетонов* и по действию факторов агрессивности морской среды на *деструкцию бетона защитного слоя* арматуры и её коррозии.

Количественные описания *результатов обследований* фактов деструкции бетона защитного слоя арматуры и её коррозии в конструкциях портовых гидросооружений были и остаются маркерами как для калибровки разрабатываемых *составов смесей* гидротехнических бетонов, так и для *расчётных методов* количественных показателей скоростей проникновения агрессивных к компонентам бетона веществ и процессов в его массив. Учитывая, что первые бетонные причалы и сухие доки появились в бухте Золотой Рог порта Владивосток в конце 19 века, затем в течение полутора-трёх десятков лет ещё в десяти дальневосточных портах и порт-пунктах, к сороковым годам 20-го века уже были получены результаты первых отечественных обследований воздействия агрессивных факторов на поверхность бетона в море.

Периодические обследования портовых сооружений на Тихоокеанском побережье началось сразу после Великой Отечественной войны под руководством В.М. Москвина (НИИЖБ) [2], в последующие годы такими обследованиями руководили П.П. Ступаченко

¹ Здесь решение проблемы долговечности ж/б элементов МГТС рассматривается именно как методологически обоснованный путь интеграции численных описаний частных, но априори взаимосвязанных взаимовлияющих процессов деструкции и разрушения бетона защитного слоя арматуры.

² Распоряжение Правительства РФ от 21 декабря 2019 г. № 3120-р об утверждении «Плана развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 года».

(ДВПИ, 1957–58; 1964–66; 1974 гг.) [3], С.Н. Алексеев (НИИЖБ, 1958–59 гг.) [4] и другие учёные.

Большие объёмы обследований портовых сооружений всех портов ДВ бассейна в 1972–76 гг. были выполнены владивостокской и сахалинской группами исследователей-водолазов ДальморНИИПроекта, а сотрудниками кафедры Гидротехники ДВПИ в 1976–88 гг. были обследованы все сооружения нового Восточного порта в бухте Находка. В трудах этих и ряда зарубежных учёных деструкция бетона к моментам обследований объяснялась, в первую очередь, превышением проектного срока службы сооружений в тяжёлых гидрометеорологических условиях морей (т.к. преобладающее количество портов было построено в 1940–60-е годы). История обследований периода до 1990 г. и краткое изложение их результатов приведены в монографии [5].

В новом столетии масштабные работы по обследованию портовых гидротехнических сооружений проводились в 2002–2003 гг. в пяти основных портах и порт-пункте Кайган на о. Сахалине ОАО «Гидротекс» под руководством А.Т. Беккера [6]. По данным этих обследований сооружений было определено, что средний износ МГТС составил 29%, при разбросе 13–65%. В последнее десятилетие продолжились обследования деградации бетонных поверхностей портовых причальных сооружений [7], а также проводились натурные исследования по оценке долговечности бетона в конструкциях морских сооружений по опыту строительства на Дальнем Востоке [8–10]. Обзор ряда результатов этих исследований приведён в работе [11].

Современные технологии изготовления ж/б элементов в морском гидротехническом строительстве характеризуются совершенствованием методик подбора компонентов бетона, включая добавки, в совокупности направленных на повышение его долговечности в условиях эксплуатации в морской среде, в том числе в холодных регионах. В то же время, несмотря на внедрение более эффективных составов бетонов, способов защиты конструкций от внешних воздействий, по данным современных обследований портовых, а в последнее десятилетие и шельфовых сооружений, более половины ж/б элементов морских гидротехнических сооружений на Дальнем Востоке имеют дефекты бетона на их поверхностях. В том числе имеются множественные участки с оголённой арматурой (рис. 1), снижающие несущую способность ж/б элементов, требующих как минимум реконструкции, а часто и проведения капитального ремонта – ограничивая тем самым их полноценную эксплуатацию.

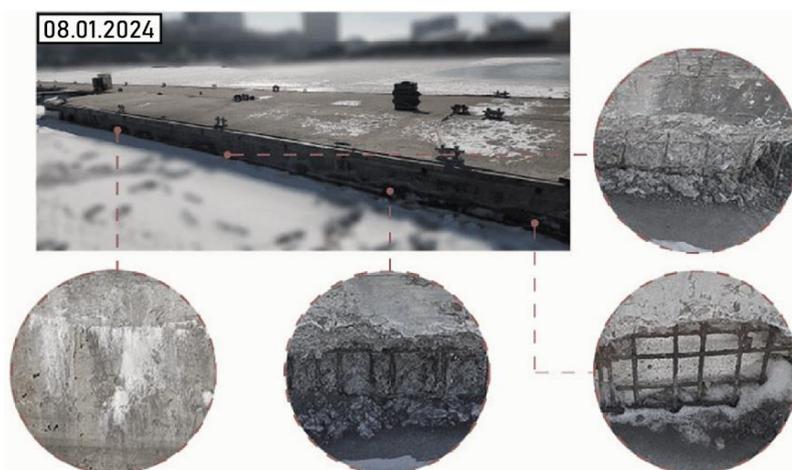


Рис. 1. Участки деградации поверхностей бетона в железобетонной надстройке причальной части Северного мола Спортивной гавани в г. Владивостоке с отслоением защитного слоя арматуры [фото К.И. Патлая]

Fig. 1. Areas of concrete surface degradation in the reinforced concrete superstructure of the berth section of the Northern pier of the Sports Harbor in Vladivostok with delamination of the protective layer of reinforcement [photo by K.I. Patlay]

В работах *производственно-технологического плана* [10–14] отмечается, что деградация бетонной поверхности вновь построенных и реконструируемых сооружений в виде отсла-

ивания на горизонтальных поверхностях, растрескивания и откалывания фрагментов бетона защитного слоя с оголением арматуры наблюдается в среднем в течение первых 7–10 лет после ввода конструкции в эксплуатацию, свидетельствуя о значительном несоответствии между проектным и фактическим сроком службы конструкций МГТС. Одной из причин этого авторы ряда работ считают недоработки в технологии изготовления элементов конструкций. В частности, в исследовании [14, с. 75] авторы отмечают, что «один из факторов, вызывающий внезапный отказ бетона, – недостаточный период выдерживания (вызревания) после изготовления конструкций». Также внезапный отказ может быть обусловлен характером внешних воздействий, например «обмерзанием конструкций морским льдом». На основании современных теоретических положений структурной теории цементных бетонов и опыта строительства морских сооружений, в работе [10, с. 25], приведена «методологическая основа определения критической зрелости структуры бетона». В качестве такой основы авторы предлагают *метод обеспечения нормируемой морозостойкости* на этапе строительства, состоящий в оценивании критерия зрелости структуры бетона и регулировании времени его выдерживания до готовности воспринимать морозные воздействия.

Результаты периодических обследований технического состояния причальных сооружений портов Тихоокеанского побережья страны, периодически проводившихся здесь со второй половины 20-го века и до настоящего времени, позволили выявить массовое несоответствие технического состояния бетонных поверхностей сооружений портовой инфраструктуры уровню нормативных требований. Такая ситуация до недавнего времени была характерна для всего Дальневосточного бассейна, где на протяжении более 5,6 тыс. морских миль расположено 22 морских торговых и 10 рыбных морских портов и порт-пунктов с суровыми зимними периодами, основная часть которых – с круглогодичной навигацией. Их доля в грузообороте портов России составляет 35%. Через эти порты сегодня проходит более 95% всех грузопотоков Дальнего Востока [6, 15]. Отсюда – роль и значение поддержания в рабочем состоянии их причального фронта в экономике региона и страны в целом, если учесть, что при нарушении сроков проведения ремонтных работ их стоимость возрастает не пропорционально времени задержки ремонта, а с существенным превышением, достигая и превышая стоимость постройки нового сооружения при двойном превышении срока задержки капитального ремонта [16]. Это делает актуальной цель повышения надёжности МГТС на основе совершенствования контроля их технического состояния и *методологии проектного* прогнозирования долговечности их ж/б конструкций.

Современное обеспечение нормативно-правового обоснования мер для расчётов долговечности железобетонных элементов конструкций МГТС

Учитывая большую стоимость, длительные проектные сроки эксплуатации МГТС и их роль в обеспечении экономической безопасности страны, в последние десятилетия система мер нормативно-правового обоснования проектно-строительного обеспечения надёжности и долговечности этих сооружений была существенно обновлена и дополнена на основании Федерального закона ФЗ № 184-ФЗ от 27.12.2002 «О техническом регулировании» [17]. Морские гидротехнические сооружения, как искусственные объекты, находящиеся в сфере применения федерального законодательства о регулировании отношений, возникающих при разработке, принятии, применении и исполнении обязательных требований к продукции и связанным с требованиями к продукции процессам проектирования (включая изыскания), строительства и эксплуатации, являются объектами технического регулирования Федерального закона ФЗ № 384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [18]. Этот закон, определяя права и обязанности участников регулируемых его положениями отношений, является первой, *законодательной* ступенью обеспечения безопасности строительных объектов. Безопасность МГТС, процессов, осуществляемых на всех этапах их жизненного цикла, обеспечивается в процессе реализации этой задачи на её второй ступени – посредством *нормирования*: установления соответствующих требованиям технического регламента проектных

значений параметров и их качественных характеристик в течение всего жизненного цикла сооружений. Поэтому во всех процессах изысканий, проектирования, строительства, поддержания состояния таких параметров и характеристик на требуемом уровне при эксплуатации, реконструкции, текущих и капитального ремонта сооружений все субъекты, участвующие в этих процессах, обязаны руководствоваться и *выполнять требования* настоящего Федерального закона и требования, устанавливаемые системой Норм, предусмотренные его содержанием.

Как показывают результаты большинства известных обследований МГТС, тяжёлые гидрометеорологические условия их эксплуатации играют основную роль в развитии деструкционных процессов в ж/б элементах конструкций МГТС. В то же время, как указывается во многих работах [5–10, 14–16, 19], освещающих вопросы снижения сроков службы конструкций МГТС, в качестве причин износа их ж/б элементов, наряду с действием природных факторов и низким качеством проектно-изыскательских и строительных работ, отмечаются также и *нарушения условий эксплуатации сооружений*.

По мнению большого числа авторов, последний фактор является одной из важных причин снижения долговечности ж/б элементов МГТС, который проявляется в виде сокращения «расчётного срока службы» ж/б элемента при отсутствии должного контроля за состоянием сооружений и невыполнения своевременных «поддерживающих» ремонтных работ. В рамках существующей мировой практики негативные результаты действия деструкционных процессов в элементах сооружений должны получать *оценку затрат на реновационные работы*, поддерживающие сооружение в пригодном состоянии для его эффективной эксплуатации в течение всего его «жизненного цикла» [18]. На рис. 2 схематически представлена концепция жизненного цикла конструкции с входящими в эту концепцию понятиями её «долговечности» в течение её «расчётного срока службы ... до капитального ремонта и (или) реконструкции с предусмотренным техническим обслуживанием ... или возобновления его эксплуатации после капитального ремонта или реконструкции» согласно обновлённому ГОСТу³. Также нормативно в этом документе закреплено понятие «срок службы: продолжительность нормальной эксплуатации строительного объекта с предусмотренным техническим обслуживанием и ремонтными работами (включая капитальный ремонт)».

Процесс А на рис. 2 демонстрирует *проектную концепцию* ухудшения технического состояния конструкции с течением времени, поскольку она под воздействием факторов внешней среды начинает постепенно разрушаться, по сравнению с её первоначальным состоянием, в котором она находилась при постройке (нулевой уровень отсчёта срока службы и эксплуатационной пригодности). Кривая А – идеальная траектория достижения конструкцией её *проектной долговечности* к моменту, когда конструкция достигает неприемлемого уровня повреждения, поэтому время наступления этого момента принимается за «полный» *срок службы сооружения (T_{р.с.})*.

Несовершенство существующих нормативных методик подбора ингредиентов бетонной смеси, их пропорций, выбора добавок, а также трудности прогнозирования действия природных агрессивных факторов на проектный состав бетона в конкретных условиях морской акватории, действия случайных механических воздействий и пр. – всё это вызывает преждевременную деструкцию бетона, появление местных разрушений (кривая Б на рис. 2). Поэтому в реальных условиях эксплуатации МГТС срок службы сооружения³ – это суммарное время всех его расчётных сроков эксплуатации (T_i) и времени капитального ремонта ($t_{к.р.}$) – до состояния его минимальной эксплуатационной пригодности, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна. Очевидно, что для ремонтов местных разрушений требуются значительные средства, при дальнейшей эксплуатации ремонтные затраты будут возрастать. Возможно, что в ряде случаев экономически выгоднее увеличить затраты на проектирование и возведение конструкции и надёжную защиту её ж/б элементов, что позволит число и стоимость ремонтов в процессе эксплуатации объектов сократить. Нормативное закрепление всех этих и ряда других понятий играет весьма существенную роль в обеспечении

³ ГОСТ 277751-2014. Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения.

непрерывной работы сооружения.

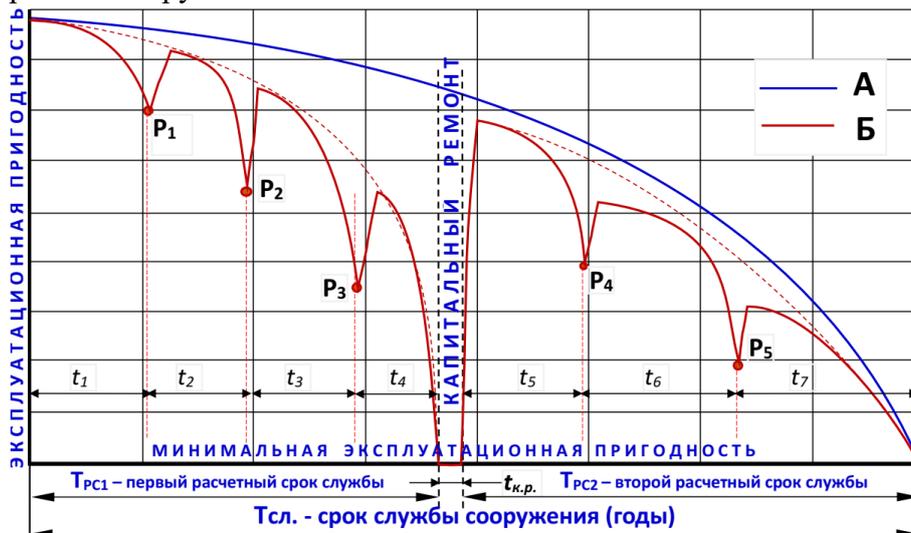


Рис. 2. Траектория ожидаемого (А) и фактического (Б) жизненного цикла конструкций МГТС

Fig. 2. Expected (A) and actual (B) life cycle of MGTS structures

Для поддержания проектной траектории снижения долговечности (кривая А) при быстром износе бетона может потребоваться проведение восстановительных ремонтов (моменты времени P_i на рис. 2), поддерживающих конструкцию в надлежащем техническом состоянии. Как для восстановительных работ, так и для капитального ремонта необходимы значительные вложения финансовых средств, поэтому для однозначного ответа на очевидный вопрос об источнике финансирования имеется традиционное и чёткое определение такого источника – реновационные отчисления от приносимого эксплуатируемым объектом дохода. Как показал анализ [15], низкая экономическая эффективность функционирования дальневосточных портов второй половины прошлого века, например, не позволяла инвестировать средства на работы по восстановлению причального фронта, требующих от 20 до 40% первоначальной стоимости строительства. Эти расходы не покрывались платой субъектов предпринимательства, *арендующих причалы*, т.к. эти активы долгие годы оставались объектами государственной собственности. Экономический фактор незаинтересованности арендаторов инвестировать в не принадлежащие им портовые активы собственные средства во многих случаях являлся определяющим, обусловившим *низкую долговечность сооружений* причального фронта многих портов.

Ситуация стала меняться с появлением Федерального закона 26 октября 2007 года № 261-ФЗ от «О морских портах в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [1]. С введением этого закона, разрешающего предоставление земельных участков в границах портов, занятых гидротехническими сооружениями (МГТС), в собственность инвесторам, внимание к контролю и оценке технического состояния МГТС в стране на фоне их непрекращающегося износа увеличилось. Причина такого повышения внимания связана, прежде всего, с тем, что в указанном законе [1] официально введено понятие «владелец портового гидротехнического сооружения», в ст. 16 нормативно закреплена его обязанность «осуществлять эксплуатацию объектов инфраструктуры морского порта в соответствии с требованиями обеспечения промышленной безопасности ... и требованиями технических регламентов». С появлением в 2010 г. «Технического регламента о безопасности объектов морского транспорта»⁴ были нормативно закреплены достаточно конкретные требования к причалам как «объектам инфраструктуры морского транспорта», которые должны обладать прочностью и устойчивостью, позволяющими «выдерживать динамические и

⁴ Постановление Правительства РФ от 12 августа 2010 г. № 620 «Об утверждении технического регламента о безопасности объектов морского транспорта» (с изменениями на 7 октября 2019 года).

статические воздействия ветра, взволнованной водной поверхности, давление и инерционные нагрузки, исходящие от груза и изделий, ледовые нагрузки и влияние вибрации и тряски». Согласно введённому с 2016 года национальному ГОСТу⁵ в числе внешних воздействующих факторов оказывающих воздействие на характеристики элементов МГТС, обозначен «*коррозионно-активный агент морской воды*: вещество, находящееся в морской воде, приводящее к ускорению процессов разрушения» бетона и коррозии арматуры в нём. По данному ГОСТу этими веществами являются хлориды и сульфаты.

Также в числе обеспечивающих безопасность МГТС субъектов законодательно закреплена «*эксплуатирующая организация*»: «Предприятие или организация (юридическое лицо любой организационно-правовой формы) или физическое лицо, осуществляющее техническую эксплуатацию гидротехнического сооружения на праве собственности или ином законном основании»⁶. В обязанностях эксплуатирующей организации установлены *нормативные требования* о проведении на регулярной основе *обследований состояния* конструкций МГТС и *ведение мониторинга* их технического состояния. Утверждённые в нормативном порядке материалы обследований и заключения о техническом состоянии сооружения являются исходными данными для включения их в состав технических заданий на разработку проектов ремонтов объекта инфраструктуры морского транспорта, включая капитальный ремонт, которые должны выполняться по утверждённым проектам производства ремонтных работ объекта.

Одной из основных целей принятия технических регламентов [1, 17, 18] и их требований, закреплённых соответствующими нормами, является «предупреждение действий, вводящих в заблуждение приобретателей», что должно достигаться тем, что МГТС «... *должны удовлетворять требованиям безопасности в течение всего периода их эксплуатации при условии выполнения приобретателем этих объектов требований, установленных ... нормативными документами*»⁶. То есть МГТС не должны иметь физического износа, препятствующего нормальной эксплуатации. Достижение указанной цели подтверждается обязательным предоставлением эксплуатантом «Декларации о соответствии сооружения установленным требованиям ... с доказательственными материалами по результатам освидетельствования сооружения»⁷ от отраслевых экспертных организаций, которые выполняют технический контроль портовых ГТС с использованием строгой нормативной базы. Декларация «о соответствии ...» предоставляется органам *государственного контроля (надзора)*, которые, руководствуясь требованиями Федерального закона от 31.07.2020 г. № 247-ФЗ «Об обязательных требованиях в Российской Федерации» [20], обязаны выполнять *оценку соответствия объектов* нормативным требованиям и останавливать эксплуатацию сооружения до устранения элементов несоответствия объекта требованиям норм.

Подтверждением этого является опыт строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений на побережье о. Сахалина в течение последних 40 лет [9]. При этом основой рекомендаций проектировщикам⁸ является сохранение составов бетона, а строителям – выполнения правил производства работ⁹ при бетонировании конструкций и проектных требований по прочностным и деформативным свойствам бетона и арматуры. Целью традиционного вероятностного подхода «назначения долговечности» бетона в конструкциях являются рекомендации по обеспечению её *живучести, т.е. «неразрушения»* конструкции, хотя при этом не приводится какой-либо *критерий*, определяющий возможный *срок её службы* [21].

⁵ ГОСТ Р 56257-2014 Характеристика факторов внешнего природного воздействия. Общая классификация.

⁶ ГОСТ Р 54523-2011 Портовые гидротехнические сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния (с Изменением № 1 2013 г.). М.: Стандартинформ, 2012.

⁷ СП 389.1326000.2018 Техническая эксплуатация объектов инфраструктуры морского порта.

⁸ СП 287.1325800.2016 Сооружения морские причальные. Правила проектирования и строительства (с Изменением № 1 от 13 марта 2024 г.). М.: Минрегион России, 2016.

⁹ СНиП 3.07.02-87. Гидротехнические морские и речные транспортные сооружения / Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 1998. 68 с.

Из содержания всех рассмотренных материалов можно констатировать, что, несмотря на большой объём исследований, «нормируемый» в настоящее время *срок службы сооружения* (рис. 2А) до потери эксплуатационных показателей либо до необходимости проведения ремонта (рис. 2Б) является результатом применения вероятностного подхода, что не имеет научного описания протекания комплекса процессов в явлении деградации бетона. Пока нет утверждённой методики его расчёта, основанной на детерминистском подходе с интегральным *математическим описанием всех процессов деградации бетона*, что объясняет частые несоответствия между качественными показателями бетона (или его компонентами) и долговечностью. Учитывая приведённый анализ, вопрос о необходимости проектирования «по предельному состоянию 3-й группы» или «по параметрам долговечности», наряду с традиционным подходом или взамен его, сегодня является ключевым в обеспечении возможности адекватного конкретному искусственному сооружению из железобетона расчёта длительности его жизненного цикла [22]. Этот вопрос стоит наиболее остро на фоне участвовавших случаев внезапного (в течение 3–4 месяцев после ввода в эксплуатацию) разрушения конструкций МГТС, что особенно характерно для зоны переменного уровня воды в зимний период [14].

Следуя «классическим» путём к цели нормирования количественных параметров долговечности бетона защитного слоя ж/б элементов МГТС при эксплуатации в условиях действия агрессивной среды, необходимо разработать математическое описание процесса – модель деградации структуры бетона в защитном слое арматуры. Безусловно, создание современной расчётной модели долговечности бетонных поверхностей МГТС, контактирующих с агрессивной морской средой, прежде всего должно базироваться не только на *формализации всех накопленных результатов натурных обследований* технического состояния элементов конструкций причалов, но и на формализованных результатах всех исследовательских работ по данному направлению.

В то же время такая модель должна базироваться на детерминистском подходе к количественному описанию качественной картины всех стадий развития деградации бетона этого слоя от суммарного действия агрессивных факторов. В модели одновременного действия ряда факторов должен найти отражение результат действия каждого фактора, его вклада в общий – конечный результат комплексного процесса деструкции бетона. И для каждого фактора должна быть определена собственная модель описания процесса его воздействия на структуру бетона (аналитическая функция влияния) и критерий, достижение которого «реализует» результат этого частного процесса в виде «добавки» к суммарному *результату деструкции бетона* защитного слоя арматуры при действии нескольких факторов.

Следовательно, цель разработки деградационной модели бетона защитного слоя арматуры – реализация научно обоснованной *концепции его долговечности* – создание математического аппарата для описания деградации структуры бетона под действием процессов воздействия агрессивных факторов для прогноза длительности *сохранения исходной структуры бетона защитного слоя и её качественных свойств* по отношению к стальной арматуре.

Концепция и критерий долговечности бетона защитного слоя ж/б элементов конструкции морского сооружения в определении его срока службы

Под «работой» конструкции принято понимать её поведение на стадии эксплуатации как «выполнение» своих проектных функций без ограничений в условиях действия расчётных нагрузок без потери её жёсткости и устойчивости, в т.ч. с допустимыми местными повреждениями. Эксплуатационная пригодность конструкции есть *качественная характеристика её работоспособности*, являющаяся функцией времени, и с этой точки зрения она прямо связана с понятием долговечности. Потому что накопление внутренних и поверхностных повреждений конструкции, т.е. её деградация, представляет собой процесс постепенного снижения во времени характеристик её работоспособности до *конкретно измеряемого критического уровня*, когда эксплуатация конструкции по соображениям безопасности должна быть прекращена.

Поэтому в контексте данной работы *КОНЦЕПЦИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ* ж/б элемента конструкции МГТС рассматривается как поддержание *прочности и долговечности бетона защитного слоя* конструкционной арматуры элемента конструкции на протяжении всего срока службы сооружения. Это значит, что в бетоне защитного слоя должны выполняться условия сохранения *его структуры и её качественных свойств* как единого комплекса *главных функций* защитного слоя по отношению к стальной арматуре:

- защиты арматуры от механических повреждений при воздействии ударов, вибраций и других нагрузок, которые могут повлиять на целостность арматуры;
- обеспечения сцепления между арматурой и бетоном, предотвращения смещения арматуры внутри бетона и обеспечения равномерного распределения напряжений;
- обеспечения барьера между арматурой и внешней средой, снижающего проникновение влаги и агрессивных веществ к арматурным стержням для их защиты от коррозии;
- оказывания сопротивления разрушению от внутренних напряжений, возникающих от статических и динамических нагрузок на конструкцию.

Согласно Межгосударственному стандарту «Надёжность строительных конструкций и оснований» и приведённому выше перечню главных функций *защитного слоя* ж/б элемента конструкции МГТС, за его предельно допустимое состояние по долговечности *следует считать отказ по второму предельному состоянию*, выражающийся в виде коррозионного *отслоения защитного слоя* бетона с оголением арматуры ж/б элемента. *При накоплении таких отслоений* «возникает необходимость ограничения во времени эксплуатации сооружения из-за ...неприемлемого снижения эксплуатационных качеств или расчётного срока службы сооружения (например, коррозионные повреждения)» ... «*до указанных параметров* его дальнейшая эксплуатация недопустима, затруднена или нецелесообразна»³. Принятое решение о предельном состоянии элементов конструкций МГТС, в соответствии с требованиями «Технического регламента о безопасности объектов морского транспорта»⁴ должно быть *количественно* установлено в задании на проектирование как *КРИТЕРИЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ* для оценки работоспособности *защитного слоя бетона*.

Важно отметить, что на данный момент модели, используемые для прогнозирования коррозионных повреждений железобетона, могут быть действительны только для одного из возможных критических повреждений, приведённых выше [13, 21–24]. Предлагаемый здесь критерий долговечности есть показатель результата действия комплекса деградационных процессов в защитном слое бетона, и поэтому он является оптимальным *индикатором критического состояния* работоспособности ж/б элемента, обладающим следующими характеристиками:

- лёгкостью визуального определения и возможностью количественной оценки;
- показывающий им уровень повреждения не представляет угрозу для безопасности жизни и здоровья людей;
- «критериальное повреждение» может быть относительно легко отремонтировано с точки зрения восстановления как целостности конструкции, так и требований к её долговечности.

Эксплуатируемое с даты постройки или реконструкции МГТС, согласно п. 231 Регламента⁴, при обнаружении по данным регулярного обследования его ж/б элементов их физического износа более 30% относительно проектных параметров (*здесь, например, n% поверхности отслоения бетона и оголения арматуры ж/б опор в зоне переменного уровня, ригелей, балок и плит эстакады и лицевой стенки верхнего строения причала*) эксплуатирующей организацией принимается решение о выведении сооружения из эксплуатации, проведении капитального ремонта, реконструкции или утилизации сооружения. Дата принятия такого управляющего решения и определяет «РАСЧЁТНЫЙ СРОК СЛУЖБЫ СООРУЖЕНИЯ» (рис. 2Б).

В настоящее время есть необходимость и возможность в рамках принятой концепции и критерия деградации ж/б элементов МГТС обобщить теоретические и экспериментальные исследования проблемы долговечности ж/б элементов МГТС с целью формирования адекватной

природе процессов имитационной модели для прогноза срока их службы. Принимая детерминистический подход к решению поставленной задачи прогноза долговечности (срока службы) ж/б элемента, следует использовать полностью определённые данные о параметрах факторов и процессах их действия на свойства бетона и арматуры.

Факторы и процессы деградации защитного слоя бетона при инициации и развитии явления коррозии арматуры

Результатами большого числа теоретических разработок, лабораторных и натурных исследований установлены причинно-следственные связи явления деградации защитного слоя бетона от арматуры в железобетонных элементах как от действия внешних факторов агрессивной среды на изменения структуры бетона и его свойств на протяжении определённого отрезка времени, так и от внутренних факторов, отражающих состав ингредиентов бетона и их свойства.

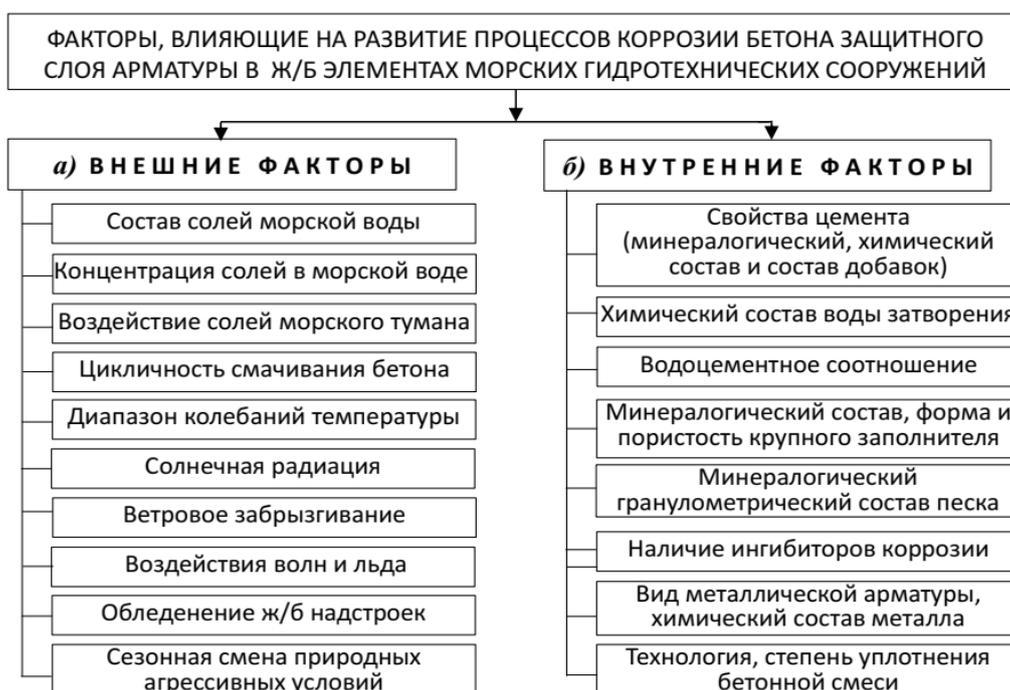


Рис. 3. Внешние (а) и внутренние (б) факторы, определяющие долговечность бетона МГТС

Fig. 3. External (a) and internal (b) factors the durability of MGTS concrete determining

К *внешним факторам*, определяющим интенсивность коррозионных процессов в ж/б элементах МГТС, относят [2–9, 14, 19, 21–24]: солевой состав морской воды, концентрацию ионов солей, температуру воды и воздуха, режим смачивания поверхностей ж/б элемента конструкции, механическое действие волн и льда, ветровой напор, морской туман, действие солнечной радиации, обледенение верхнего строения конструкций МГТС и др. (рис. 3а).

К *внутренним факторам* (рис. 3б), определяющим сопротивление поверхностных слоёв бетона воздействию внешней агрессивной среды, относят его состав и диффузионные характеристики (что также установлено многими исследованиями [2–9, 14, 19, 21–24]), на которые самым существенным образом влияют: вид, химический и минеральный состав вяжущего в бетоне; состав добавок; химические составы заполнителей; плотность бетона; структурная пористость и степень её водонасыщения; вид арматуры и др. Кроме того, большое значение имеет технология приготовления, укладки, уплотнения смеси и ухода за бетоном в процессе его твердения, включая пропаривание и полив.

Согласно принятой выше концепции долговечности бетона защитного слоя арматуры, основной характеристикой возникающего предельно допустимого состояния отказа следует

считать отказ по второму предельному состоянию, выражающийся в виде отслоения бетона защитного слоя и оголения арматуры на некотором участке поверхности ж/б элемента. Как показывает практика, необратимые проявления деструкции ж/б элементов конструкций МГТС при непрерывном воздействии на их поверхности агрессивной морской среды и условий эксплуатации проявляются в результате одновременных развивающихся процессов как прямого механического снижения толщины защитного слоя от истирания, ударов, отколов и пр., так и в результате химической (*атмосферно-солевая морская коррозия*), физической (*морозное разрушение*) и физико-химической коррозии (доступ солей к арматуре через трещины).

При исследовании коррозии бетона принято анализировать развитие двух основных процессов (рис. 4): диффузионный перенос агрессивных веществ в его структуре, отражающий глубину коррозионных повреждений; химические реакции реакционноспособных компонентов цементного камня с агрессивными веществами.



Рис. 4. Схема механизмов химической коррозии арматуры в железобетоне
 Fig. 4. Mechanism of chemical corrosion of reinforcement in reinforced concrete

В настоящее время в литературе исследователи выделяют два основных, превалирующих среди других химических процесса, приводящих к тому, что деструкция железобетона достигает критической стадии, это: *карбонизация* и *хлоридизация* [5, 13, 23]. Процессы этого типа показывают, каким образом и насколько произошло изменение деформативно-прочностных свойств бетона по глубине. Но большинство из них, в силу сложностей учёта степени влияния фактора, имеют ряд недостатков. В частности, описание транспортных механизмов агрессивной субстанции носит общий, поверхностный характер, не учитывается связывающая способность конкретного вида бетона, возраст конструкции, результат накопленного влияния внешних факторов среды эксплуатации (мороза) и напряжённое состояние конструкции на скорость коррозионного процесса.

Карбонизация происходит из-за проникновения атмосферного CO_2 , который реагирует с водой в порах с образованием углекислоты. Учитывая постоянную щёлочность поровой влаги в цементном камне бетона, способствующей сохранению химически пассивного состояния поверхности стали, её коррозия в бетоне – относительно медленный процесс. Фронт карбонизации продвигается сквозь бетон, пока не достигнет стали, и пассивирующий слой бетона вокруг арматуры разрушается, когда рН падает до 8,0.

Хлоридизация в структуре бетона защитного слоя арматуры нарастает, когда рН здесь падает ниже 11,0. Для бетона с незначительным количеством хлоридов, изначально содержащихся в бетонной смеси, постепенное его накопление до количества, инициирующего процесс коррозии арматуры, происходит преимущественно за счёт диффузии (движения ионов под воздействием градиента концентрации). **Скорость проникновения хлоридов** зависит от качества бетона и окружающей среды. В случае тонкого защитного слоя бетона невысокого качества, в условиях попеременного его смачивания и высыхания, а также в прибрежных и морских условиях хлориды могут быстро достигать арматуры. Инкубационный период этого процесса определяется предельным содержанием хлорид-ионов (0,1–0,4% от массы цемента). И уже при наличии хлоридов в бетоне, как правило, развивается питтинговая коррозия поверхности арматуры, в присутствии O_2 и H_2O процесс коррозии арматуры активизируется.

Деструкционные нарушения структуры бетона при проникании атмосферного углекислого газа, химически активных элементов морской воды начинаются с поверхностного слоя бетона, контактирующего с водой, и постепенно распространяется вглубь поверхности защитного слоя. В условиях морской среды процессы диффузии углекислого газа и ионов хлора из морской воды протекают одновременно (рис. 4). *Важное значение* для кинетики коррозионных повреждений имеет знак и уровень действующих в бетоне напряжений. Так, при сжатии бетона до уровня напряжений, соответствующих началу структурного микротрещинообразования, проницаемость бетона для агрессивной среды снижается до минимума. При растяжении проницаемость бетона для агрессивной среды возрастает при любых уровнях напряжений. Первичная деструкция структуры этого конгломерата обычно рассматривается как нарушение структуры его матрицы – цементного камня.

Но следует отметить, что в мире больше внимание уделяется исследованию химической коррозии арматуры в бетоне и в меньшей степени – его долговечности при физической коррозии, которая проявляется при попеременном увлажнении и высыхании, а также при попеременном замораживании и оттаивании объектов. Изучено и установлено, что важнейшим процессом деструкции структуры бетона в элементах конструкций МГТС является дополнительное водонасыщение и увеличение растягивающих напряжений в структуре вследствие **замерзания поровой воды**, что объясняет отсутствие корреляции между существующими методами испытаний и эксплуатационными характеристиками конструкций [12, 13].

Поскольку цементный бетон относится к капиллярно-пористым коллоидным материалам, в которых проникающая жидкая среда имеет различные формы связи, и в первом, и во втором случаях структура бетона разрушается от действия влаги в виде образующихся в её порах и капиллярах солей или льда. Вода в больших порах бетона замерзает в первую очередь, а незамёрзшая вода в мелких порах/капиллярах образует поток, который создаёт гидравлическое давление, приводящее к трещинообразованию [13]. При эксплуатации МГТС *в реальных условиях такие факторы среды, как влага (вода) и температура, могут воздействовать на ж/б элементы в опасных сочетаниях их длительности и интенсивности.*

Также установлено [2–6, 9, 12], что в бетоне защитного слоя элементов конструкций МГТС в условиях циклического смачивания и высыхания быстрее происходят процессы **карбонизации и депассивации арматуры**. Объёмы разрушений защитного слоя бетона от воздействия негативных факторов, включая высокое содержание гигроскопических морских солей в воздухе, самым существенным образом зависят от высотных отметок расположения конструкций относительно спокойного уровня моря, также как и от их ориентации по сторо-

нам света и относительно берега. В зоне попеременного смачивания или ветрового забрызгивания процессы диффузии ионов хлорида в защитный слой бетона идут намного быстрее, чем карбонизация, и поэтому здесь он разрушается быстрее. При этом в порах и трещинах бетона могут накапливаться кристаллы соли, что также приводит к его ускоренному разрушению.

Известные на данный момент базовые функции влияния различных физических, химических, механических факторов на нарастание деструкции бетона приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Факторы и функции их влияния на процессы деструкции защитного слоя [25, 26]

Factors and their influence functions to the processes of the concrete protective layer destruction [25, 26]

Факторы	Функции влияния	Примечания
Влажность (φ)	$f_{Cl}(\varphi) = (1 + \frac{(1-\varphi)^4}{(1-\varphi_c)^4})^{-1};$ $f_W(\varphi) = a_0 + \frac{1 - a_0}{1 + (\frac{1 - \varphi}{1 - \varphi_c})^s}$	φ – относительная влажность пор; φ_c – критический уровень влажности ($\approx 0,75$); t_0 – время определения коэффициента диффузии; t_e – эквивалентный период гидратации;
Возраст бетона (n)	$f_{Cl}(n) = (\frac{t_0}{t})^m; \quad f_W(n) = 0,3 + \sqrt{\frac{13}{t_e}}$	$\lambda_{ca}, \lambda_{fa}$ – коэффициенты для крупных и мелких заполнителей; v_{ca}, v_{fa} – объёмные соотношения крупных и мелких заполнителей;
Карбонизация (R)	$f_{Cl}(R) = \frac{1 - \lambda_{ca} v_{ca} f_p \phi}{1 - \lambda_{fa} v_{fa} \phi + \mu};$ $f_W(R) = 1 - \zeta R;$	f_p, ϕ – функции поровой перколяции и пористость бетона после карбонизации; ϑ – насыщенность пор; μ – линеаризованный коэфф-т сорбции;
Температура (T)	$f_{Cl}(T) = f_W(T) = e^{\frac{E}{G}(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T})}$	E – энергия активации; T_{ref} – исходная температура начального коэффициента диффузии;
Содержание свободных хлоридов (C_f)	$f_{Cl}(C_f) = 1 - k(C_f)^p$	G – газовая константа; R – степень карбонизации;
Напряжённое состояние конструкции (σ)	$f_{Cl}(\sigma) = (1 + A_{c(t)} \times (\frac{\sigma_{c(t)}}{f_{c(t)}}))^2$	$\sigma_{c(t)}$ – номинальное значение напряжения при сжатии (растяжении); $f_{c(t)}$ – предельное значение напряжения при сжатии (растяжении);
Водоцементное отношение ($ВЦ$)	$f_{Cl}(W) = \exp k_{ВЦ} (\frac{1}{ВЦ_0} - \frac{1}{ВЦ})$	$a_0, s, m, k, p, \zeta, A_{c(t)}, k_{ВЦ}$ – коэффициенты, определяемые экспериментально

Логико-математическое описание концепции детерминистического подхода к оценке долговечности ж/б элементов конструкций МГТС

Бетон — многофазная пористая самоорганизующаяся открытая диссипативная система, которая в «исходном состоянии» до монтажа в конструкцию находится в **равновесном состоянии** с водой в порах бетона. Через поверхности ж/б элементов при их установке в конструкцию в агрессивной среде морской воды и при действии знакопеременных температур происходит доступ агрессивных факторов внешней среды к компонентам структуры бетона. Это приводит к механическим и химическим изменениям в структуре бетона, что вызывает нарушение внутреннего равновесия в системе «бетон». Различные деструкционные процессы в бетоне, ослабляющие связи материальных компонентов и внутренние прочностные связи в них, переводят бетон в **неравновесное, коррозионно-деструктурированное состояние**, далёкое от точки термодинамического равновесия с окружающей средой, т.к. оно связано с уровнем действующих напряжений и характеризуется развитым коррозионным повреждением.

Следуя обозначенной выше цели, все известные теоретические и эмпирические зависимости – модели проявления действия каждого из *агрессивных факторов* с соответствующими результатами их действия в виде деструкции структуры бетона, от даты погружения ж/б элемента конструкции в агрессивную среду и до момента *разрушения бетона защитного слоя арматуры*, ввиду неодновременности начал и окончаний периодов их действия, необходимо «расположить на шкале времени развития деструкции бетона защитного слоя», подобно схеме на рис. 4. Время, которое затрачивается на «параллельное с карбонизацией» проникновение хлоридов через защитный слой бетона и *инициализацию коррозии* арматуры, обычно обозначается в исследованиях как *инкубационный период* и его стремятся связать с прогнозированием срока службы конструкций.

Но вследствие того, что бетон, благодаря высокой щёлочности, является идеальным материалом для защиты стальной арматуры, коррозия стали в бетоне – медленный процесс, занимающий относительно длительное время, даже в случае суровых условий воздействия. Поэтому срок службы ж/б элементов в агрессивной среде целесообразно моделировать состоящим из отдельных временных фаз (рис. 5), ограниченных «*промежуточными критическими (предельными) состояниями*» и бетона, и арматуры в зоне защитного слоя, характеризующимися соответствующими им «индикаторами» повреждений [16]. Данный подход был впервые использован Tuutti [27], предложившим концептуальную модель, разделяющую срок службы железобетонной конструкции на две отдельные стадии: *инициирования и распространения коррозии арматуры*, которая рассматривалась также рядом других авторов [12, 23, 28].

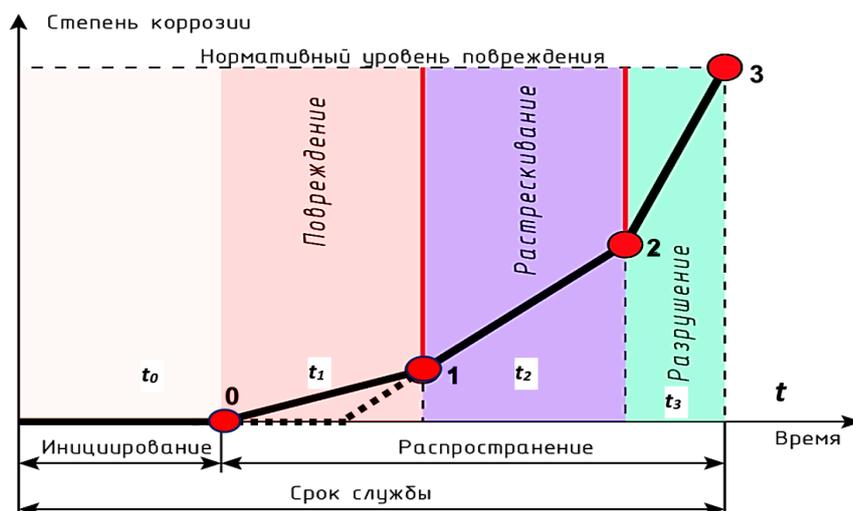


Рис. 5. Интегральная модель срока службы ж/б элемента конструкции МГТС

Fig. 5. Conceptual service life model of reinforced concrete structure

На рис. 5 с позиций детерминированного подхода к анализу процесса разрушения бетона защитного слоя арматуры представлена диаграмма в виде четырёх связанных причинно-следственными связями последовательных этапов и, соответственно, четыре характерных интервала времени. При этом стадию распространения коррозии, в соответствии с этапами развития физических нарушений структуры бетона, можно разделить на три фазы:

- фаза «*Повреждение*» характеризуется временем t_1 развития уже протекающего процесса разрушения пассивирующего слоя арматуры и распространения, наполнения продуктами её коррозии, прилегающей к разделу «сталь–бетон» зоны, с частичной их реакцией с компонентами бетона без оказания давления на окружающий бетон. Переход от первой фазы распространения коррозии ко второй (точка 1) можно определить как момент времени начала трещинообразования в структуре бетона на мезоуровне;

- фаза «*Расстрескивание*» характеризуется временем t_2 коррозии арматуры, не защищённой пассивирующим слоем, и развитием интенсивного трещинообразования с достижением отдельными трещинами поверхности железобетонного элемента и их раскрытием до

определённой величины; конец фазы растрескивания (*точка 2*) – время, при котором ширина раскрытия трещины от действия расширяющихся продуктов коррозии арматуры достигает определённого (критического) значения. Этот этап считается наиболее важным из-за видимой ширины трещины на поверхности бетона, т.к. её контроль стал нормой в попытке минимизировать влияние трещин на разрушение, вызванное коррозией;

– фаза «Разрушение» характеризуется временем t_3 интенсивной коррозии арматуры до предельного уровня, характеризуемого слиянием трещин в макротрещины (*точка 3*), сопровождающееся отторжением слоя бетона защитного слоя с обнажением арматурных стержней.

В рамках принятой концепции данного исследования, с учётом декомпозиции процесса деградации железобетонного элемента конструкции МГТС, как это представлено на идеализированной диаграмме на рис. 5, расчётное время срока службы ж/б элемента T_{PC} является суммой означенных интервалов времени:

$$T = t_0 + t_1 + t_2 + t_3 . \quad (1)$$

Безусловно, такое модельное представление реального комплексного процесса деградации бетона будет давать достаточно упрощённый, идеализированный результат, лишь опосредованно характеризующий натуральный стохастический процесс разрушения бетона защитного слоя. Практика показывает, что при высокой плотности бетона, надлежащей толщине защитного слоя и отсутствии его повреждений (трещины, сколы, каверны и пр.) арматура в бетоне сохраняется в химически пассивном состоянии (*этап t_0*), без явных коррозионных повреждений долгие годы и десятилетия [5, 6, 7]. Но последующее появление первых трещин, их рост (*этапы t_1 – t_2*) облегчают доступ агрессивной среды к поверхности арматуры, способствуют возникновению и развитию её коррозии [16, 23, 25, 26, 29, 30].

Из-за сложности физико-химических процессов и их стохастического взаимодействия в настоящее время нет общепринятой методологии оценки **предельной деструкции бетона** защитного слоя ж/б элементов конструкций МГТС, которая делает модель Tuutti основой, обеспечивающей «стыковку» математических моделей, описывающих «частные» процессы на всех этапах жизненного цикла ж/б элемента, эксплуатируемого в морских условиях. Но тем не менее разработанные с использованием **метода деградационных функций**, позволяющего учитывать механические, тепловые и химические энергетические воздействия на структуру бетона, «упрощённые математические модели долговечности могут служить рациональной основой проектирования» [21, с. 15].

К настоящему моменту разработаны и верифицированы данными лабораторных и натуральных экспериментов ряд «частных» моделей расчёта времени карбонизации до полной деактивации поверхности арматуры (t_0), а также времени начала трещинообразования и достижения хлоридами поверхности арматуры и её первичных и развитых коррозионных повреждений (t_1 – t_2). Этим исследованиям посвящены работы многих авторов [16, 23, 25, 26, 29, 30], предложивших модели, описывающие скорости деградации защитного слоя бетона с использованием общих законов аналитической теории диффузии А. Фика.

Суть метода деградационных функций заключается в том, что интегральный деградационный эффект складывается из частных результатов воздействия отдельных агрессивных факторов на компоненты структуры бетона, действие которых считается независимым. Деградационные функции для каждого конкретного случая получают из анализа «работы» деградационных моделей – математических выражений, описывающих изменение напряжённого состояния бетона конструкции во времени, например, растягивающих напряжений в бетоне в опасном сечении балки. Процесс карбонизации обычно описывается одномерным дифференциальным уравнением первого закона Фика, описание диффузионного транспорта хлоридов основано на втором законе Фика. Оба закона представляют собой дифференциальные уравнения *скорости нарастания концентрации агрессивного вещества* на фронте его продвижения в структуре бетона в частных производных.

Эффективные коэффициенты *диффузии CO_2 , хлоридов и влаги* в структуре бетона определяются на основе начальных коэффициентов диффузии, рассчитанных при эталонных усло-

виях окружающей среды, путём их умножения на *функции влияния* модификационных факторов (табл. 1). При этом, как правило, априори принимается, что скорость продвижения фронта диффузии агрессивного фактора (CO_2 или ионов Cl^-) в структуре бетона с учётом его влажности является достоверной оценкой показателя скорости продвижения *фронта деградации* структуры бетона. Решения соответствующих нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных при определённых начальных условиях позволяют определить продолжительность стадий деградации структуры бетона защитного слоя (рис. 5): стадии инициирования (t_1), а также стадий раскрытия первичных трещин растяжения на поверхности ж/б элемента (t_2) и времени начала активной коррозии арматуры (t_3).

В реальных условиях эксплуатации прогнозируемые и наблюдаемые параметры трещинообразования могут существенно отличаться, в результате чего было высказано предположение, что характеристики трещин являются ненадёжными индикаторами коррозионного процесса, проверка которого продемонстрировала отсутствие какой-либо корреляции между шириной трещины и скоростью коррозии. Одним из возможных объяснений является то, что ширина поверхностной трещины сама по себе не может надёжно описать состояние границы раздела сталь–бетон. С другой стороны, для целей проведения ремонтных работ локальное/глобальное разрушение конструкции не может быть принято в качестве предельного состояния в основном из-за соображений безопасности человека. Таким образом, в качестве заключительного отрезка комплексного процесса деструкции защитного слоя бетона элементов МГТС *следует рассматривать его отслаивание* (с полным либо частичным оголением арматурных стержней), приводящее к возможности прямого контакта арматуры с морской средой и прогрессированием разрушения железобетонной конструкции. Пример описания процесса отслоения бетона защитного слоя показан ниже.

Концептуальные модели явления отслаивания бетона защитного слоя для формирования его имитационной численной модели

Как известно, трещина растяжения в бетоне на внешней стороне поверхности ж/б элемента зарождается при условии, что растягивающие напряжения в бетоне от объёмного расширения продуктов коррозии арматурного стержня достигнут предела его прочности на растяжение. Объём образованных продуктов коррозии – гидроксидов $\text{Fe}(\text{OH})_2$ и $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (ржавчины) по разным оценкам превышает объём исходного металла, подвергшегося коррозии, в 2–6 раз [2, 4, 23]. Сложное напряжённое состояние в массиве бетона защитного слоя, созданное давлением продуктов коррозии стали арматурного стержня, предотвращает свободные перемещения их границы «в глубь» массива ж/б элемента.

Учитывая, что в реальных конструкциях под защитой слоя бетона расположен ряд параллельных арматурных стержней, суммарное давление от расширения продуктов коррозии стали соседних стержней формирует условия отслаивания бетона защитного слоя. С учётом суперпозиции одновременного давления продуктов коррозии отдельных стержней на бетон защитного слоя, этот процесс приводит к появлению отторжения бетона защитного слоя по общей поверхности разрушения, параллельной внешней грани ж/б элемента. Учитывая нелинейное деформирование бетона под нагрузкой, ключевым является вопрос о том, как именно моделировать процесс зарождения и развития явления отторжения защитного слоя бетона.

Концепция равномерного распределения продуктов коррозии стали (рис. 6б) [11]. Первые модели формирования межфазной переходной зоны между поверхностью арматурного стержня и бетона, ввиду отсутствия методик и инструментов количественных оценок геометрии и размеров этой зоны, основывались на концепции равномерного распределения слоя продуктов коррозии стали вокруг стержня (рис. 6а) [11, 23, 29]. Поэтому существующие теоретические исследования описываемого здесь явления в большинстве своём опираются на аналитическую модель толстостенного цилиндра, имитирующую этот процесс равномерным увеличением его внутреннего диаметра [26, 28, 29, 31] под действием давления, порождаемого расширением продуктов коррозии стали арматурного стержня. В условиях плоской деформации бетонный цилиндр должен растрескаться при выполнении условия:

$$\sigma_{min} \cdot (D + 2d) = f_t \cdot 2c, \tag{2}$$

где σ_{min} – минимальное растягивающее напряжение, требуемое для начала развития трещины; D – диаметр арматуры, м; d – толщина слоя продуктов коррозии, м; f_t – прочность бетона на растяжение, МПа; c – величина защитного слоя, м.

В представленной на рисунке бб схеме модели суммарное давление от *равномерного расширения* продуктов коррозионного разрушения стали стержней арматуры реализуется в развитии давления на физическую поверхность бетона, пограничную с поверхностью арматуры. Здесь деформации развиваются преимущественно в сторону наименьшего сопротивления, т.е. давление на условную «обратную» поверхность защитного слоя бетона вызывает развитие трещин растяжения и «выдавливание» некоторого объёма бетона из его массива. А с противоположной стороны стержней арматуры бетон находится в условиях всестороннего сжатия и не разрушается. В то же время в ряде работ предлагались модели, основанные на предположении о «пористой» зоне конечной толщины вокруг межфазной среды «сталь–бетон». В ряде работ, в частности, в работе [30] авторы считали, что продукты коррозии должны сначала заполнить эту зону, прежде чем их расширение начнёт создавать давление на окружающий бетон. В этой работе разработана *аналитическая модель* возникновения трещин в толстостенном бетонном цилиндре с учётом пористой зоны на границе раздела «сталь–бетон» и определено соотношение между процентной потерей массы стали и внутренним радиальным давлением, вызванным коррозией. Но, как было установлено многими исследованиями [28, 29, 32, 33], такой подход, основанный на предположении о «пористой» зоне конечной толщины вокруг арматурного стержня, приводит к физически некорректным результатам.

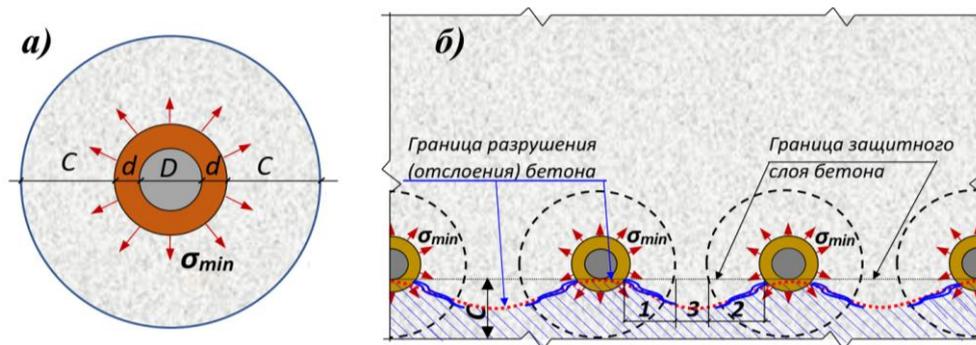


Рис. 6. Формирование отторжения бетона защитного слоя арматуры при её коррозии, по [11]

Fig. 6. Formation the rejection's concrete of protective layer of reinforcement by its corrosion, on [11]

Концепция неравномерного распределения продуктов коррозии стали. Современными инструментальными исследованиями было установлено, что предположение о *равномерном распределении продуктов коррозии* арматуры по её окружности не соответствует реальной ситуации. В исследованиях [33, 35], например, для случая ускоренной коррозии арматуры в условиях искусственного климата с использованием технологии сканирования с помощью электронной микроскопии и электронного зонда было показано, что в процессе коррозии её продукты проникают в пористую зону на границе раздела «сталь–бетон» не только в начале процесса коррозии, пока они полностью не заполнят «пористую» зону конечной толщины, но и могут диффундировать в бетон постоянно с течением времени. Постепенно эта зона превращается в слой, состоящий из бетона и продуктов коррозии стали, и давление на окружающий бетон начинает оказываться после заполнения контактной зоны.

Ряд исследователей отмечают, что суммарный объём продуктов коррозии «примерно в три-четыре раза превышает объём проржавевшего объёма металла прутков». При этом авторы работы [33], например, показали, что из-за ограничений, налагаемых окружающим бетоном, «глубина коррозии стали распределена по Гауссу под углом к стальному стержню» [33, с. 2264] (рис. 7а), а продукты коррозии распределяются таким образом, что толщина их слоя обратно пропорциональна кратчайшему расстоянию до поверхности защитного слоя бетона.

То есть, наибольшая толщина продуктов коррозии D_{max} располагается ближе к поверхности защитного слоя и полукольцом влево и вправо вглубь бетона вокруг стержня арматуры [32]. А с другой стороны стержня слой коррозии равномерен и мал настолько, что не учитывается в дальнейших расчётах, поскольку, соотношение между значениями максимального u_1 и минимального u_2 радиальных смещений продуктов разрушения, согласно [34, с. 6], находится в пределах 1/30. В полярной системе координат, установленной в центре тяжести арматуры (рис. 7б), степень коррозии поверхности арматуры характеризуется потерей её радиуса со стороны свободной поверхности ж/б элемента D_θ , что может быть описано следующим образом:

$$D_\theta = R - \frac{(R - D_m) \cdot R}{\sqrt{(R + D_m)^2 \cdot \cos^2 \theta + R^2 \cdot \sin^2 \theta}}, \tag{3}$$

где: D_θ – потеря радиуса стержня арматуры (объёма стали) при полярном угле θ ; R – исходный радиус стержня; D_m – максимальная глубина его коррозии (потеря радиуса). Из соотношения (3) можно получить уравнение «поверхности объёма продуктов коррозии арматуры» в процессе коррозии следующим образом, имея в виду описание явления в плоской задаче:

$$D_s(\theta) = \left\{ \frac{(R + D_{max}) \cdot R}{\sqrt{(R + D_{max})^2 \cdot \cos^2 \theta + D^2 \cdot \sin^2 \theta}} - R \right\}, \tag{4}$$

где: $D_s(\theta)$ – толщина слоя продуктов коррозии в точке с углом θ , а D_{max} – это максимальная толщина слоя продуктов коррозии.

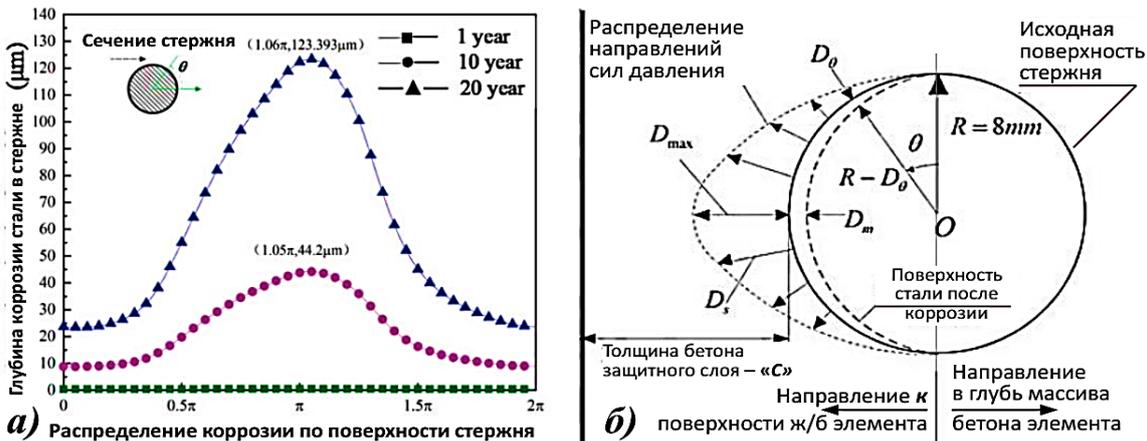


Рис. 7. Эллиптическая модель неравномерного коррозионного расширения арматуры, по [33]

Fig. 7. Elliptical model of non-uniform corrosion expansion of reinforcement, on [33]

В конце начального периода коррозии под действием силы расширения ржавчины в бетоне, окружающей арматуру, когда продукты коррозии заполнят зазор между арматурой и бетоном, создаётся поле радиальных перемещений, и окружающий арматуру бетон будет сжиматься создаваемым давлением, что приведёт к росту напряжений расширения в бетоне защитного слоя.

Примеры реализации имитационных численных моделей срока службы ж/б элементов МГТС по критерию долговечности отслоения бетона защитного слоя

Моделирование коррозионного процесса до фазы отслоения бетона от арматуры с использованием МКЭ. Растрескивание бетона защитного слоя арматуры, вызванное коррозией стали под воздействием хлоридов, в работе [28] было смоделировано в двумерной постановке задачи о плоской деформации идеализированной модели бетонного цилиндра. Диффузия хлоридов в зависимости от температуры проводилась с использованием алгоритма массовой диффузии по закону Фика в ABAQUS FEM solver. Также с использованием алгоритма ABAQUS XFEM с 8-узловыми конечными элементами были смоделированы процессы, связанные с разрушением

структуры бетона: от диффузии хлоридов до коррозии стали и растрескивание бетона защитного слоя. Для определения диффузии хлоридов использовался закон Фика, а потеря массы в результате коррозии стали была получена с использованием закона Фарадея. Давление продуктов коррозии стали на границе раздела бетон–сталь моделировалось путём воздействия на поверхность бетона в виде радиально направленных перемещений с равномерной эпюрой по окружности.

Разрушение бетона в работе описывается моделью развитием Хиллерборгской когезионной трещины, которая образуется при передаче напряжения с одной поверхности на другую и определяет ослабление напряжения в направлении, нормальном к трещине. Функция размягчения (разрыва связей структуры бетона) определяется пределом прочности при растяжении f_t (Мпа) и энергией разрушения G_F (Дж/м²). Критерием прочности принято значение энергии разрушения в конечном элементе, определяющем зарождение трещины и его разделение ею.

Вертикальные трещины зарождаются в бетоне и распространяются вертикально с увеличением длины и ширины. Наряду с основными вертикальными трещинами вдоль границы бетон–сталь появляются и другие «размытые» трещины (наклонённые под углом 45° или 90°), но их длина значительно уступает основным. Эти трещины могут распространяться и соединяться в пространстве между стальными стержнями и образовывать слой отторжения бетона защитного слоя арматуры, если стальные стержни расположены близко друг к другу и имеют толстое бетонное покрытие (рис. 8А).

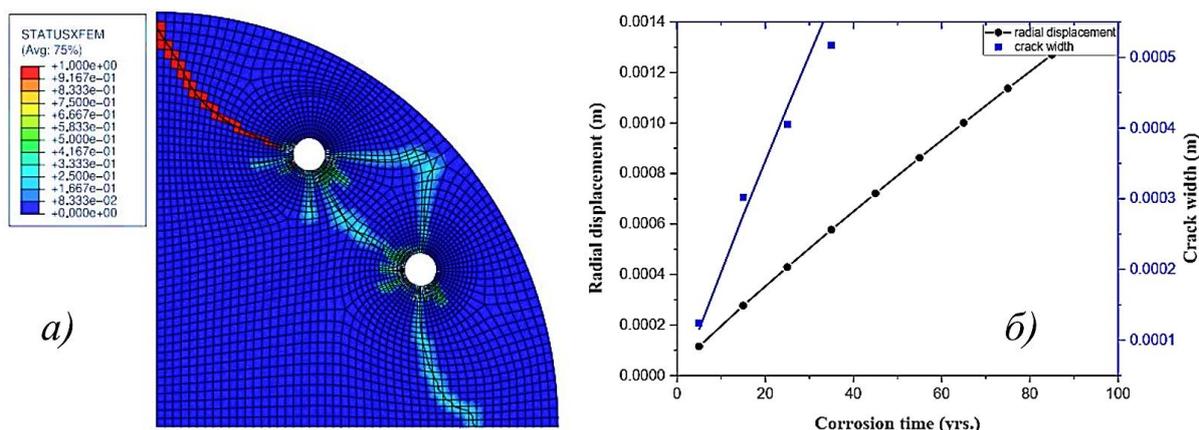


Рис. 8. КЭ моделирование распространения коррозии (фаза «Разрушение») [28]

Fig. 8. FE modeling of corrosion propagation ("Destruction" phase) [28]

При таком расслоении бетонный элемент становится неустойчивым, происходит быстрый сброс накопленных расширяющих напряжений в бетоне. Энергия разрушения полностью израсходована, и напряжение теперь передаётся на продукты коррозии, находящиеся между трещинами. На рис. 8Б показано изменение ширины трещины и радиального смещения в бетонном покрове от времени воздействия в хлоридных средах.

Моделирование коррозионного процесса до фазы «разрушение» с использованием метода разрушения фазового поля. При численном моделировании явлений коррозионного разрушения бетона защитного слоя в виде отслоения его от арматуры и массива ж/б элемента в результате расширения продуктов коррозии арматуры авторы работы [33], например, рассматривали такую задачу на образцах бетона с одиночными стержнями и с рядом стержней в условиях плоской деформации и с граничным условием неподвижности кромок образца. Для испытаний взяты образцы из бетона с квадратным/прямоугольным поперечным сечением с одной стороной – 100 мм и второй – 100/270 мм. Диаметр стальной арматуры – 16 мм, а толщина защитного слоя бетона («с») – переменна. В примерах взяты параметры обычного тяжёлого бетона, рассматриваемого как однородный материал.

Численное решение задач коррозионного растрескивания образцов в рассматриваемой работе реализуется *методом разрушения фазового поля* в конечно-элементном пакете Abaqus, позволяющим *избежать необходимости в сетке пользовательских элементов*. В отличие от других подходов к описанию движущихся поверхностей, метод фазового поля основан на концепции термодинамики Гриффита и объединяет описание процессов накопления повреждений и разрушения материала в единую структурную модель, основанную на принципе локального минимума суммы энергий упругости и разрушения. В рамках этого метода рост трещины по любой траектории может быть предсказан без каких-либо дополнительных критериев, что обусловлено глобальной минимальностью и преобразованием накопленной энергии в энергию разрушения. Поэтому этот метод подходит для прогнозирования сложных явлений разрушения, включая зарождение, распространение, разветвление и слияние трещин в деформируемых твёрдых телах.

Решение в [33] осуществлено путём воздействия на границу «сталь–бетон» с *овальным очертанием* эпюры нагружения поверхности бетона в виде радиально направленных деформаций с максимумом D_{max} в центре давления. Приращение деформаций (нагрузки) на каждом шаге составляло $1,2 \times 10^{-4}$ мм. Этот метод позволяет «запоминать» результаты вычислений предыдущего шага (временного отрезка), в т.ч. *прогноза направления образования трещин*, и использовать их для следующих итераций вычислений. На Рис. 9 приведены графические иллюстрации результатов расчётов развития трещин в бетоне защитного слоя при различных значениях его толщины, но при одинаковом значении давления продуктов коррозии арматуры, создаваемого смещением их границы при расширении до $D_{max} = 35.4 \times 10^{-3}$ мм.

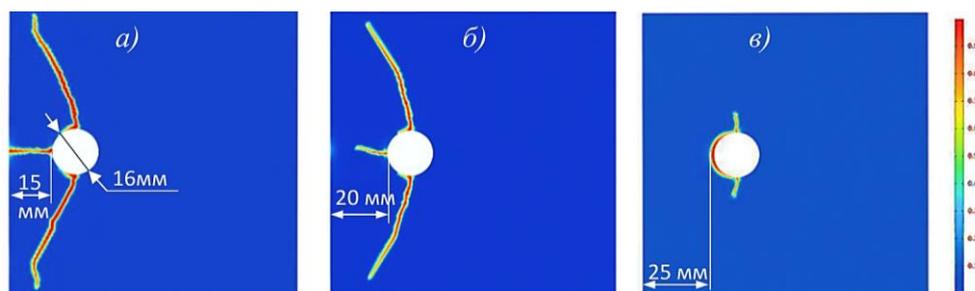


Рис. 9. Рост коррозионных трещин в бетоне для разной толщины защитного слоя, по [33]

Fig. 9. The corrosion cracks growth in reinforced concrete if the protective layer thickness increasing, on [33]

Полученные из экспериментов изображения трещин наглядно демонстрируют, что с увеличением толщины защитного слоя бетона длина трещин растяжения в области стержня арматуры значительно уменьшается при том же уровне нагрузки, а при большей толщине защитного слоя угол между трещинами и внешней поверхностью защитного слоя постепенно уменьшается, что подтверждает выводы Базанта [29].

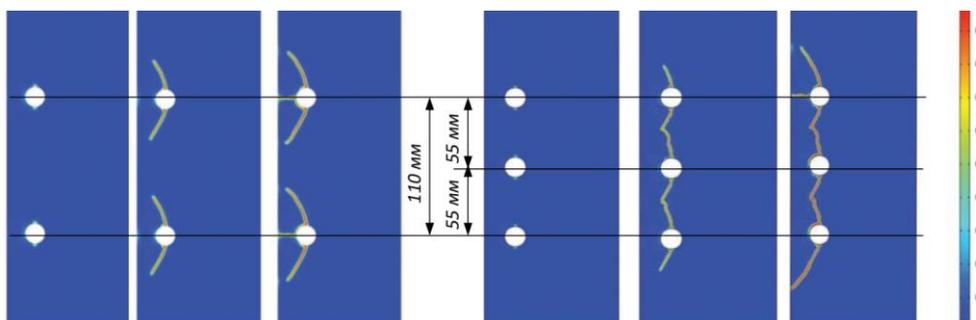


Рис. 10. Развитие зоны отслоения защитного слоя бетона при разном шаге арматуры, по [33]

Fig. 10. Development of the peeling zone of the concrete protective layer with different reinforcement pitches, on [33]

На рис. 10 показаны закономерности растрескивания бетона защитного слоя небольшой, но одинаковой толщины в случае рядного армирования для трёх уровней достижения давления – нагрузки от расширения продуктов коррозии арматуры D_{max} : а), з) $\leq 6,0 \cdot 10^{-3}$ мм; б), д) $\leq 18,0 \cdot 10^{-3}$ мм; в), е) $\leq 35,4 \cdot 10^{-3}$ мм. В случае двух стальных стержней с большим расстоянием между ними защитный слой разрушается отдельными выколами. Аналогичное исследование образца другого типа с небольшим расстоянием между армирующими элементами демонстрирует взаимовлияние распространения соседних трещин, когда они соединяются, формируя общую поверхность консолидированной трещины, т.е происходит отслаивание бетона и оголение нескольких рядов арматуры. Результаты моделирования наглядно демонстрируют применимость метода фазового поля разрушения для моделирования коррозионного отторжения бетона защитного слоя арматуры и её оголения.

Обсуждение необходимости разработки нормативной методологии информационного моделирования срока службы ж/б элементов МГТС по долговечности бетона защитного слоя арматуры

Ранее в статье на основе ретроспективного анализа результатов объёмных исследований состояния ж/б элементов конструкций МГТС тихоокеанских российских портов были представлены примеры недостаточной эффективности комплекса нормативных требований прежних периодов в части нормирования их срока службы на базе теории вероятностей, где учитывается стохастическая природа основных воздействующих факторов агрессивной морской среды. Но используемые в нормах уравнения предельных состояний не содержат переменной времени и обеспечивают мгновенную надёжность и долговечность в момент возведения или строительства конструкции, а последующие происходящие изменения не учитываются. Это отмечается всеми исследователями, включая зарубежных, констатирующих, например: «оценка качества бетона с точки зрения долговечности должна рассматриваться как действительно основанная на эксплуатационных характеристиках», ... «Предварительной квалификации и лабораторных испытаний смесей недостаточно, что означает, что многие из так называемых "эксплуатационных характеристик" на данном этапе являются лишь частичными» [19, с. 237]. Поэтому проблема отсутствия расчётной методологии прогнозирования срока службы ж/б элементов МГТС, в перспективе растущей востребованности морских перевозок в Дальневосточном регионе и по Северному морскому пути, делает *актуальной целью повышения надёжности* МГТС не только в силу их высокой стоимости, но и как объектов, от исправного состояния которых зависит безопасность в разных её аспектах для людей, сооружений, субъектов бизнеса, регионов и страны в целом.

С учётом этого в настоящее время обновлена и частично доработана российская база нормативно-правового обоснования мер проектного обеспечения методологии директивного назначения срока службы сооружения. Но этого недостаточно, произошедший директивный переход к управлению «жизненным циклом сооружений» однозначно показал необходимость разработки адекватной реалиям природной среды методологии проектного прогнозирования долговечности ж/б конструкций МГТС. При этом, несмотря на колоссальные объёмы выполненных на данный момент разнообразных исследований, в частности многостадийности явления коррозии на основе процессов карбонизации и хлоридизации бетона – с целью выработки единой нормативной методологии расчёта его долговечности в агрессивной среде, такой методологии пока нет и научное описание протекания комплекса процессов в явлении деградации бетона отсутствует. В то же время универсальность законов диффузии, описывающих процессы коррозии бетона, обуславливает возможность использования имитационного моделирования при прогнозировании долговечности бетона при воздействии различных агрессивных сред.

Основной причиной существующего положения дел в этой области, что показано в соответствующих разделах статьи, является высокая *сложность многофакторного явления коррозии стали* в массиве бетона как многофазного гетерогенного пористого материала, подвергающегося комплексному постоянному и периодическому воздействию ряда агрессивных факторов

морской среды. В то же время ряд исследований показывает, что, с учётом характера поровой структуры бетона, наличия и параметров микротрещин, решение задачи возможно путём построения иерархической имитационной модели и её решение численными технологиями МКЭ. Эти примеры говорят о том, что для безаварийной эксплуатации и продления ресурса сооружений *нужны новые научные подходы* к прогнозу технического состояния ж/б элементов МГТС на всех стадиях их жизненного цикла. *Нужны алгоритмы*, построенные на реальных количественных критериях уровня надёжности и прогноза долговечности ж/б элементов.

Таким образом, для перехода к прогнозированию срока службы МГТС по параметрам долговечности необходима «самодостаточная» содержательно-формальная *методология (комплекс моделей и методов)*, базирующаяся на детерминистском подходе к количественному описанию качественной картины всех стадий развития деградации бетона защитного слоя от суммарного действия агрессивных факторов. Практическое применение методологического подхода, основанного на характеристиках бетона и параметрах среды, для расчётной оценки и кодификации срока службы требует следующих элементов: а) критерия предельного состояния; б) заданного срока службы сооружения; в) математической модели деградации бетона; г) перечня тестов на соответствие требованиям; д) жёсткого определения процедур технического обслуживания и стратегий ремонтов и е) системы контроля качества. Критерии предельного состояния долговечности бетона должны быть определены количественно, с чёткими физическими значениями, например процент растрескивания или отслоение поверхности и пр.

В методологии комплексного действия ряда факторов должен найти отражение результат их одновременно-последовательного действия, вклада каждого в общий – конечный результат комплексного процесса деструкции структуры порового пространства бетона с учётом химической активности элементов цементной матрицы. И для каждого агрессивного фактора должна быть определена собственная модель описания процесса его воздействия на структуру бетона (аналитическая функция влияния) и результата этого частного процесса в виде «добавки» к суммарному *результату деструкции бетона* защитного слоя арматуры при действии нескольких факторов, критерием которого может рассматриваться, например, факт *отторжения защитного слоя бетона*.

В заключение следует отметить, что целью разработки имитационной деградационной модели долговечности бетона защитного слоя арматуры должно быть логико-математическое описание научно обоснованной *концепции его долговечности* под воздействием комплекса агрессивных факторов для прогноза длительности сохранения *исходной структуры бетона* защитного слоя и её *качественных свойств* по отношению к стальной арматуре. При этом следует переходить к описанию неравномерности толщины слоя продуктов коррозии с учётом их «размытой» границы контактной зоны овального очертания в структуре бетона. Имеющиеся примеры получения решений задач в этой области методом численного моделирования с применением МКЭ показывают наиболее вероятный путь к разработке нормативной методологии имитационного моделирования срока службы ж/б элементов, работающих в агрессивной среде, *по параметрам долговечности или «по предельному состоянию 3-й группы»*, наряду с традиционным подходом или взамен его.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

В.Г. Цуприк – выявление проблематики рассматриваемой предметной области, постановка целей и задач исследования, разработка логико-повествовательного плана статьи; К.И. Патлай – сбор и системный анализ литературных источников, обобщение существующих теоретических положений и концепций, формализация накопленных данных экспериментальных исследований, написание и оформление текста статьи. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

V.G. Tsuprik – identification of the problems of the subject area under consideration, setting the goals and objectives of the study, development of the logical-narrative plan of the article; K.I. Patlay – collection and systemic analysis of literary sources, generalization of existing theoretical provisions and concepts, formalization of accumulated data from experimental studies, writing and design of the text of the article. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федеральный закон от 08.11.2007 № 261-ФЗ «О морских портах в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изменениями на 4 августа 2023 года) (редакция, действующая с 1 сентября 2024 года).
2. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты: монография. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.
3. Ступаченко П.П., Холошин Е.П., Антропова В.А. Долговечность гидротехнических железобетонных сооружений на побережье Дальнего Востока. Владивосток: Примор. совет НТО, Ком. по пробл. долговечности бетона и железобетона, 1987. 78 с.
4. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шисслъ П.М. Стойкость бетона в суровых климатических условиях. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
5. Цуприк В.Г. Прочность и долговечность бетона и железобетона морских гидротехнических сооружений в условиях Дальнего Востока: монография. Владивосток: Дальнаука, 1994. 327 с.
6. Ким Л.В. Обследование гидросооружений: учебное электронное издание: учебное пособие для вузов; Мин-во образования и науки Российской Федерации, Дальневосточный федеральный ун-т, Инженерная шк. Владивосток: ДВФУ, 2014. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
7. Вавренюк С.В., Ефименко Ю.В., Вавренюк В.Г., Фарафонов А.Э. Результаты исследования причин разрушения бетонного покрытия морского пирса на побережье Японского моря // Строительные материалы. 2019. № 11. С. 37–41.
8. Свиридов В.Н., Малюк В.Д. Оценка долговечности бетона в конструкциях морских сооружений по опыту строительства на Дальнем Востоке // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: Труды II Международной конференции. М., 2014. Т. III. С. 388–398.
9. Малюк В.В. Прогнозирование долговечности конструкций морских гидротехнических сооружений из бетона по опыту строительства и эксплуатации в суровых климатических условиях // Проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: Материалы VIII Национальной конференции с международным участием, Саратов, 15–16 ноября 2018 года / Под редакцией Ф.К. Абдразакова. Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2018. С. 223–231.
10. Малюк В.В., Малюк В.Д., Вавренюк С.В., Леонович С.Н. Метод оценки долговечности бетона морских сооружений на этапе строительства // Строительные материалы. 2023. № 10. С. 25–28. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-25-28>
11. Патлай К.И., Цуприк В.Г. Роль защитного слоя бетона в обеспечении коррозионной стойкости железобетонных конструкций морских гидротехнических сооружений // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 2 (55). С. 86–101.
12. Малюк В.В. Концепция долговечности бетона для прогноза срока службы конструкций в условиях морозного воздействия // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 4(45). С. 105–115.
13. Шалый Е.Е., Леонович С.Н., Ким Л.В. Долговечность морских сооружений при комбинированной коррозии железобетона // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2018. № 1(5). С. 65–72.
14. Малюк В.В., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Конструкционный бетон морских гидротехнических сооружений: деградационный и внезапный отказ // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: сборник статей международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 05–06 апреля 2018 г. / под. ред. А.А. Бакатовича, Л.М. Парфеновой. Новополоцк: ПГУ, 2018. С. 70–76.
15. Фисенко А.И. и др. Морские порты Дальнего Востока: изменение экономических интересов и отношений собственности // Транспортное дело России. 2016. № 3. С. 100–102.
16. Меншиков В.Л., Цикало В.А. Нормативная база по техническому контролю портовых ГТС в условиях «регуляторной гильотины» // ГИДРОТЕХНИКА. 2021. № 1(62). С. 16–21. URL: <https://www.hydroteh.ru/>.
17. Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании» (ред. от 21.11.2022).

18. Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (с изменениями на 25 декабря 2023 года).
19. Alexander M.G. Service life design and modelling of concrete structures – background, developments, and implementation // *Revista ALCONPAT*. 2018. № 8(3). P. 224–245.
20. Федеральный закон от 31.07.2020 г. № 247-ФЗ «Об обязательных требованиях в Российской Федерации» (с изменениями на 26 декабря 2024 года).
21. Степанова В.Ф., Фаликман В.Р., Королева Е.Н. Мониторинг и анализ нормативных документов в области проектирования железобетонных конструкций по их жизненному циклу // *Строительные материалы*. 2018. № 7. С. 14–19. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-761-7-14-19>
22. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // *Academia. Архитектура и строительство*. 2015. № 1. С. 93–102.
23. Леонович С.Н., Степанова А.В., Цуприк В.Г., Ким Л.В., Гуринович В.Ю. Долговечность бетона при хлоридной агрессии: монография / Инженерная школа ДВФУ. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2020. – 1 CD. [90 с.]. – Систем. требования: Acrobat Reader, Foxit Reader либо любой другой их аналог. – ISBN 978-5-7444-4673-4. – Текст: электронный
24. Степанова В.Ф., Фаликман В.Р. и др. Методическое пособие по назначению срока службы бетонных и железобетонных конструкций с учётом воздействия среды эксплуатации на их жизненный цикл. Методическое пособие. М.: Минстрой РФ, 2019. 128 с.
25. Карапетов Э.С., Шестовицкий Д.А. Прогнозирование срока службы железобетонных мостов с учетом внешних факторов и особенностей бетона защитного слоя // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2014. № 2 С. 17–29.
26. Тамразян А.Г., Минеев М.С. Калибровка модели коррозионного растрескивания защитного слоя бетона // *Безопасность зданий и сооружений*. 2021. № 2(94). С. 56–62. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-94-2-56-62>
27. Tuutti K. Corrosion of steel in concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concr. Res. Inst, 1982. 469 p.
28. Olawale A. Numerical analysis of concrete degradation due to chloride-induced steel corrosion // *Advances in Concrete Construction*. 2019. Vol. 7. № 4. P. 203–210.
29. Bazant Z.P. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures-application // *J Struct Div*. 1979. № 105(6). P. 1155–1166.
30. Троян В.В. Имитационное моделирование долговечности бетона // *Современные научные исследования и инновации*. 2015. № 2. Ч. 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/02/46976> (дата обращения: 05.03.2025).
31. Chernin L., Val D., Volokh K. Analytical modelling of concrete cover cracking caused by corrosion of reinforcement // *Materials and Structures*. 2010. № 43. P. 543–556.
32. Li K., Zhang Y., Wang S., & Zeng J. Impact of carbonation on the chloride diffusivity in concrete: experiment, analysis and application // *Materials and Structures*. 2018. Vol. 51. № 164. [Электронный ресурс].
33. Xia X., Qin C., Lu G., Gu X. and Zhang Q. Simulation of corrosion-induced cracking of reinforced concrete based on fract phase field method // *CMES*. 2024. Vol. 138. № 3. P. 2257–2276.
34. Lu S., Wen B., Niu D., Luo D. Concrete protective layer cracking caused by non-uniform corrosion of reinforcements // *Materials*. 2019. Vol. 12. № 4245. [Электронный ресурс].

REFERENCES

1. Federal Law of 08.11.2007 No. 261 “On Seaports in the Russian Federation and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation” (as amended on August 4, 2023) (version effective September 1, 2024). (In Russ.).
2. Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete, Methods of Their Protection: monograph. Moscow, Stroyizdat, 1980. 536 p. (In Russ.).
3. Stupachenko P.P., Kholoshin E.P., Antropova V.A. Durability of Hydraulic Reinforced Concrete Structures on the Coast of the Far East. Vladivostok, Primorsky Council of Scientific and Technical Association, Committee on the Problem of Durability of Concrete and Reinforced Concrete, 1987. 78 p. (In Russ.).
4. Alekseev S.N., Ivanov F.M., Modry S., Schissl P.M. Durability of concrete in harsh climatic conditions. Moscow, Stroyizdat, 1990. 320 p. (In Russ.).

5. Tsuprik V.G. Strength and durability of concrete and reinforced concrete of marine hydraulic structures in the Far East: monograph. Vladivostok, Dalnauka, 1994. 327 p. (In Russ.).
6. Kim L.V. Inspection of hydraulic structures: educational electronic publication: textbook for universities; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Far Eastern Federal University, Engineering School. Vladivostok, FEFU, 2014. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (In Russ.).
7. Vavrenyuk S.V., Efimenko Yu.V., Vavrenyuk V.G., Farafonov A.E. Results of the study of the causes of destruction of the concrete coating of the sea pier on the coast of the Sea of Japan. *Construction Materials*, 2019, no. 11, pp. 37–41. (In Russ.).
8. Sviridov V.N., Malyuk V.D. Assessment of the durability of concrete in the structures of offshore structures based on construction experience in the Far East. *Concrete and Reinforced Concrete – a Look into the Future: Proceedings of the II International Conference*. Moscow, 2014, vol. III, pp. 388–398. (In Russ.).
9. Malyuk V.V. Forecasting the durability of marine hydraulic structures made of concrete based on the experience of construction and operation in harsh climatic conditions. *Problems and Prospects for the Development of Construction, Heat, Gas and Energy Supply: Proceedings of the VIII National Conference with International Participation*, Saratov, November 15–16, 2018. Edited by F.K. Abdrazakov. Saratov, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov, 2018, pp. 223–231. (In Russ.).
10. Malyuk V.V., Malyuk V.D., Vavrenyuk S.V., Leonovich S.N. Method for assessing the durability of concrete of marine structures at the construction stage. *Construction Materials*, 2023, no. 10, pp. 25–28. (In Russ.).
11. Patlay K.I., Tsuprik V.G. The role of the protective layer of concrete in ensuring corrosion resistance of reinforced concrete structures of offshore hydraulic structures. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2023, no. 2 (55), pp. 86–101. (In Russ.).
12. Malyuk V.V. The concept of concrete durability for predicting the service life of structures under frost exposure. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2020, no. 4 (45), pp. 105–115. (In Russ.).
13. Shaly E.E., Leonovich S.N., Kim L.V. Durability of offshore structures under combined corrosion of reinforced concrete. *Bulletin of the Volga State Technological University, Series “Materials. Designs. Technologies”*, 2018, no. 1(5), pp. 65–72. (In Russ.).
14. Malyuk V.V., Leonovich S.N., Budrevich N.A. Structural concrete of offshore hydraulic structures: degradation and sudden failure. *Architectural and Construction Complex: Problems, Prospects, Innovations. Collection of articles from the international scientific conference dedicated to the 50th anniversary of Polotsk State University*, Novopolotsk, April 5–6, 2018. Ed. by A.A. Bakatovich, L.M. Parfenova. Novopolotsk, PSU, 2018, pp. 70–76. (In Russ.).
15. Fisenko A.I. and others. Seaports of the Far East: changes in economic interests and ownership relations. *Transport Business of Russia*, 2016, no. 3, pp. 100–102. (In Russ.).
16. Menshikov V.L., Tsikalo V.A. Regulatory framework for technical control of port GTS under the conditions of the “regulatory guillotine”. *HYDROTECHNICS*, 2021, no. 1(62), pp. 16–21. (In Russ.).
17. Federal Law of 27.12.2002 No. 184 “On technical regulation” (as amended on 21.11.2022). (In Russ.).
18. Federal Law of 30.12.2009 No. 384 “Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures” (as amended on December 25, 2023). (In Russ.).
19. Alexander M.G. Service life design and modelling of concrete structures – background, developments, and implementation. *Revista ALCONPAT*, 2018, no. 8(3), pp. 224–245. (In Russ.).
20. Federal Law of 31.07.2020 No. 247 “On Mandatory Requirements in the Russian Federation” (as amended on December 26, 2024). (In Russ.).
21. Stepanova V.F., Falikman V.R., Koroleva E.N. Monitoring and analysis of regulatory documents in the field of design of reinforced concrete structures according to their life cycle. *Construction Materials*, 2018, no. 7, pp. 14–19. (In Russ.).
22. Karpenko N.I., Yarmakovskiy V.N., Erofeev V.T. On modern methods of ensuring the durability of reinforced concrete structures. *Academia, Architecture and Construction*, 2015, no. 1, pp. 93–102. (In Russ.).
23. Leonovich S.N., Stepanova A.V., Tsuprik V.G., Kim L.V., Gurinovich V.Yu. Durability of concrete under chloride aggression: monograph. FEFU Engineering School. Vladivostok, Far Eastern Federal University, 2020. 1 CD. [90 p.]. Text: electronic. (In Russ.).
24. Stepanova V.F., Falikman V.R. et al. Methodological manual for assigning the service life of concrete and reinforced concrete structures, taking into account the impact of the operating environment on

- their life cycle. Methodological manual. Moscow, Ministry of Construction of the Russian Federation, 2019, 128 p. (In Russ.).
25. Karapetyan E.S., Shestovitsky D.A. Forecasting the service life of reinforced concrete bridges taking into account external factors and features of the concrete protective layer. *Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering*, 2014, no. 2, pp. 17–29. (In Russ.).
 26. Tamrazyan A.G., Mineev M.S. Calibration of the model of stress-corrosion cracking of the concrete protective layer. *Safety of Buildings and Structures*, 2021, no. 2(94), pp. 56–62. (In Russ.).
 27. Tuutti K. Corrosion of steel in concrete. Stockholm, Swedish Cement and Concr. Res. Inst, 1982. 469 p. (In Russ.).
 28. Olawale A. Numerical analysis of concrete degradation due to chloride-induced steel corrosion. *Advances in Concrete Construction*, 2019, vol. 7, no. 4, pp. 203–210.
 29. Bazant Z.P. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures-application. *J Struct Div.*, 1979, no. 105(6), pp. 1155–1166.
 30. Troyan V.V. Simulation modeling of concrete durability. *Modern Scientific Research and Innovation*, 2015, no. 2, part 1 [Electronic resource]. (In Russ.).
 31. Chernin L., Val D., Volokh K. Analytical modeling of concrete cover cracking caused by corrosion of reinforcement. *Materials and Structures*, 2010, no. 43, pp. 543–556.
 32. Li K., Zhang Y., Wang S., & Zeng J. Impact of carbonation on the chloride diffusivity in concrete: experiment, analysis and application. *Materials and Structures*, 2018, vol. 51, no. 164. [Electronic resource].
 33. Xia X., Qin C., Lu G., Gu X. and Zhang Q. Simulation of corrosion-induced cracking of reinforced concrete based on fract phase field method. *CMES*, 2024, vol. 138, no. 3, pp. 2257–2276.
 34. Lu S., Wen B., Niu D., Luo D. Concrete protective layer cracking caused by non-uniform corrosion of reinforcements. *Materials*, 2019, vol. 12, no. 4245. [Electronic resource].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Патлай Кирилл Игоревич – аспирант Департамента морских арктических технологий Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ patlai.ki@dvfu.ru

Kirill I. Patlay, Postgraduate Student of the Department of Marine Arctic Technologies of the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Цуприк Владимир Григорьевич – доктор технических наук, доцент, профессор Департамента морских арктических технологий Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ tsuprik.vg@dvfu.ru

Vladimir G. Tsuprik, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Arctic Marine Technologies of the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 16.04.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 13.05.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.