

Строительные материалы и изделия

Научная обзорная статья

УДК 691.32:620.193.7

DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-2/86-101>

К.И. Патлай, В.Г. Цуприк

ПАТЛАЙ КИРИЛЛ ИГОРЕВИЧ – аспирант, patlai.ki@dvfu.ru

ЦУПРИК ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ – доктор технических наук, профессор,
tsuprik.vg@dvfu.ru

Департамент морских арктических технологий Политехнического института

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Роль защитного слоя бетона в обеспечении коррозионной стойкости железобетонных конструкций морских гидротехнических сооружений

Аннотация. Выполнен аналитический обзор научных публикаций в области исследований влияния величины и состояния защитного слоя бетона на повреждения конструкций морских гидротехнических сооружений, обусловленные коррозией стальной арматуры. Показано общее состояние проблемы хлоридной коррозии стальной арматуры, представлены современные методы определения ее коррозионного износа по результатам инженерно-технического мониторинга за состоянием защитного слоя. На основании приведенных примеров обоснована актуальность разработки методов прогнозирования коррозионной стойкости железобетонных конструкций морских гидротехнических сооружений в целях повышения срока их службы.

Ключевые слова: морские гидротехнические сооружения, железобетон, защитный слой, хлоридная агрессия, коррозия, ледовая абразия

Для цитирования: 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.

Введение

На рубеже 19–20 вв. началось строительство причальных сооружений из бетона и железобетона во многих портах и гаванях российского Тихоокеанского побережья [29]. Часть таких сооружений эксплуатируется и в настоящее время. Но уже в 1930 г. инженеры-гидротехники при обследовании портовых сооружений г. Владивосток зафиксировали ряд серьезных случаев разрушения бетонобетонных массивов постройки 1915 г., как выяснилось, из-за использования «некачественного японского цемента неизвестного состава» в отличие от хорошо сохранившихся сооружений, «возведенных в 1896–1898 гг. с применением новороссийского цемента». С целью поиска способов увеличения срока службы портовых гидротехнических сооружений, планирования их ремонта и обеспечения безопасной эксплуатации с начала 40-х годов прошлого века ведутся обследования всех видов портовых, а в последнее десятилетие – и шельфовых сооружений [11, 13, 17, 40]. К решению проблемы деградации элементов [9] конструкций морских гидротехнических сооружений (МГТС), подверженных воздействиям агрессивной морской воды и сезонному воздействию льда (обмерзание-оттаивание, истирание, ударное воздействие и пр.), подключились ученые и специалисты ряда исследовательских

организаций и вузов [1, 3, 6, 13, 24–26, 31]. Так, в монографии [15] изложены научные основы разрушения структуры цементного камня в бетонах на различных видах цементов, являющиеся базовыми для всех дальнейших исследований в области коррозионной стойкости железобетонных (ж/б) конструкций МГТС, работающих в агрессивных средах [9–14, 21, 22, 39–41].

Результаты научных изысканий, направленных на выявление причин коррозии и разрушения поверхностных участков МГТС, показали, что подавляющее большинство морских шельфовых гидротехнических сооружений нуждается в проведении текущего ремонта, а более 400 находятся в аварийном состоянии [20]. На фоне высокой стоимости ремонтных работ, четко выраженной тенденции к сокращению срока службы и участившихся случаев внезапного отказа конструкций особо актуальным становится вопрос обеспечения надежности МГТС [12]. Это комплексное требование к их долговечности, эксплуатационной пригодности и конструкционной целостности, установленное нормативными документами¹, регламентирующими необходимость учета конкретных факторов, влияющих на концепцию надежности сооружения в целом. В ряду таких факторов одним из важнейших является качество защиты арматуры от коррозии, которое обеспечивается двумя взаимосвязанными расчетными параметрами защитного слоя бетона – его толщиной и высокой водонепроницаемостью бетона.



Рис. 1. Дegradaция ж/б отбойных блоков набережной, свайного основания пирса и кордонной плиты причала в г. Владивосток в результате хлоридной коррозии (фото: а – К.И. Патлай, б – В.Г. Цуприк, в – Л.В. Ким)

На практике первыми признаками процесса деградации являются трещины и пятна ржавчины на бетонной поверхности. С течением времени коррозионное поражение арматуры приводит к раскрытию трещин, отслаиванию бетона, снижению несущей способности и разрушению конструкции (рис. 1). Примеры разрушительного действия коррозии на конструкции МГТС демонстрируют важность исключения или, по крайней мере, значительного уменьшения степени деградации защитного слоя бетона.

Возникновение и развитие коррозионных процессов стальной арматуры в железобетонных конструкциях МГТС на всех этапах жизненного цикла сооружений

Решающее значение в сохранении работоспособного состояния ж/б конструкций на всех этапах жизненного цикла сооружений, эксплуатируемых в морской воде с элементами, работающими в зоне переменного уровня, имеет предотвращение возникновения и развития

¹ ГОСТ Р ИСО 2394-2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности. СП41.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений

коррозионных процессов в таких элементах конструкций на всех этапах жизненного цикла сооружений, начиная со стадии проектирования. Как показывает практика, разрушение конструкций МГТС в большинстве случаев обусловлено действием морозно-атмосферно-солевой морской коррозии, особенно при циклических нагрузках [6, 16, 30], чему не уделяется должного внимания.

Щелочная природа бетона, обусловленная присутствием гашеной извести $Ca(OH)_2$, обеспечивает защиту стальной арматуры в результате образования пассивной пленки из оксида железа на поверхности металла, что является изученным и доказанным фактом. Но хлориды, концентрация которых в морской воде может достигать 30 г/л, проникают в защитный слой бетона благодаря не только наличию в нем соединяющихся пор, но и способу капиллярного транспорта морской воды и ионной диффузии, и в результате этих процессов они достигают поверхности защитной пленки арматуры, разрушая ее. В зависимости от минералогического состава цемента, начального содержания щелочей, водоцементного соотношения и температурных условий твердения от 30 до 95% хлоридов [19] вступают в химическую либо физическую связь с компонентами железобетона. Но часть свободных хлоридов, накапливаясь на поверхности стальной арматуры вплоть до достижения «критического уровня», вызывают ее депассивацию – выход металла из пассивного состояния вследствие разрушения защитного слоя оксида железа. После депассивации поверхности арматуры ее коррозия резко ускоряется и протекает с образованием электрохимических ячеек, состоящих из анодных и катодных областей, между которыми протекает электрический ток (рис. 2) [29, 35].

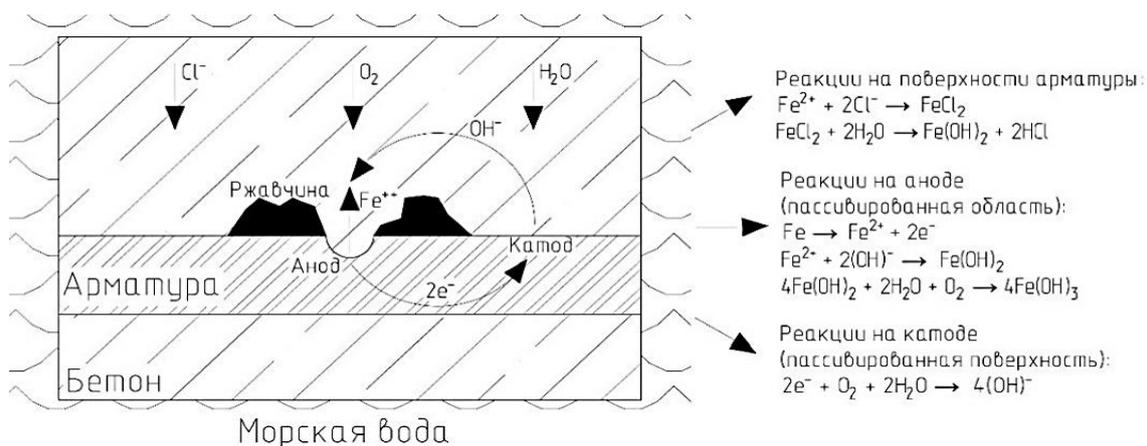


Рис. 2. Депассивация арматуры в результате хлоридной коррозии [31]

Объем образованных продуктов коррозии $Fe(OH)_2$ и $Fe(OH)_3$ (ржавчины) в 2–6 раз превышает объем исходного металла, подвергшегося коррозии. В результате на поверхности сцепления бетона и арматуры со стороны арматуры расширяющимися в результате химической реакции продуктами ее коррозии создается давление на бетон. В аналитической модели этого явления бетон вокруг стальной арматуры представляется в виде толстостенного бетонного цилиндра (рис. 3 а) с толщиной стенки, равной величине защитного слоя c [10]. Здесь предполагается, что бетонный цилиндр должен растрескаться, когда растягивающие напряжения в круговом направлении на каждой части кольца достигнут предела прочности бетона на растяжение (рис. 3 б):

$$\sigma_{min} \cdot (D + 2d) = f_t \cdot 2c, \tag{1}$$

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

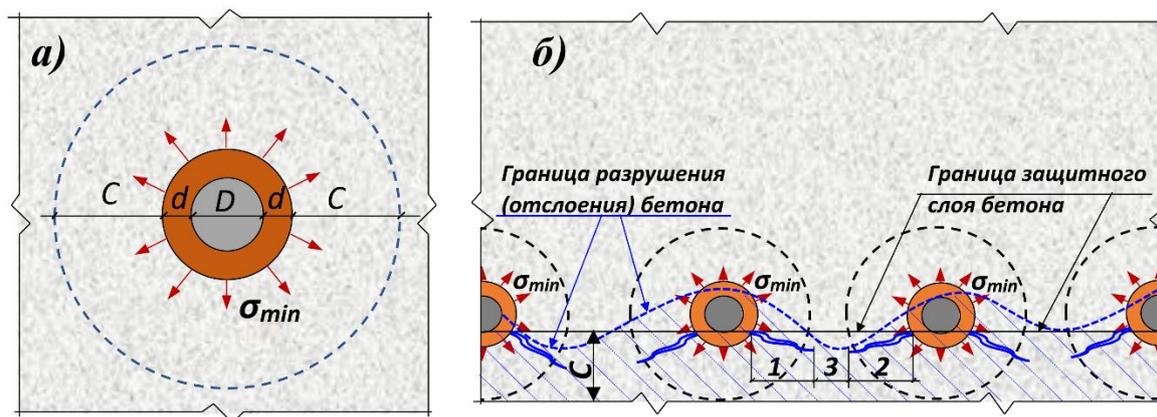


Рис. 3. Схема распределения давления продуктов коррозии стержня стальной арматуры в результате хлоридной коррозии в области защитного слоя бетона: а) – по [10]; б) – разрушение защитного слоя и оголение арматуры у свободной поверхности ж/б элемента

Из соотношения (1) можно определить минимальное напряжение, вызывающее образование трещин в бетонном цилиндре с толщиной стенки c . Но, учитывая сложное напряженное состояние в массиве бетона, это напряжение нельзя принимать как предел прочности бетона при одноосном свободном растяжении f_t , [11]. С высокой степенью вероятности можно считать, что σ_{min} будет близок к пределу прочности бетона при одноосном растяжении f_t в зоне «свободной» бетонной поверхности (рис. 3 б), где под защитным слоем бетона толщиной c располагается ряд арматурных стержней. В этом случае суммарное давление от расширения продуктов коррозионного разрушения стали соседних стержней арматуры реализуется в развитии деформаций в сторону наименьшего сопротивления. То есть давление действует на условную «обратную» поверхность защитного слоя бетона, а с противоположной стороны стержней арматуры бетон, находящийся в условиях всестороннего сжатия, практически не деформируется. Следовательно, давление на бетон защитного слоя «с обратной стороны» вызовет зарождение и рост радиально направленных от стержней арматуры трещин отрыва по некоторой длине стержней. В процессе роста такие трещины могут соединяться «на встречных» направлениях их развития от соседних стержней (рис. 3 б: 1, 2). Но в любом случае это явление приводит к уменьшению площади сопротивления бетона растяжению в межстержневом пространстве (рис. 3 б:3), что в результате приведет к отслоению фрагментов поверхности защитного слоя на наиболее пострадавших от коррозии арматуры участках ж/б элемента.

Таким образом, сопротивление ж/б конструкции разрушительному действию расширения продуктов хлоридной коррозии арматуры зависит прежде всего от проницаемости бетона и толщины его защитного слоя.

Влияние толщины и состояния защитного слоя бетона на коррозионную стойкость конструкций морских сооружений

Несмотря на достаточно глубокую изученность отдельных аспектов хлоридной коррозии железобетона [1, 2, 15, 18, 19], вопрос о защите ж/б конструкций от хлоридной коррозии остается актуальным.

В соответствии с современными представлениями для построения общей модели разрушения армированных конструктивных элементов, взаимодействующих с агрессивными средами, необходимо использовать феноменологический подход, учитывающий стадийность коррозионного поражения арматуры (рис. 4). Так как защитный слой бетона представляет собой химический и материальный барьер, препятствующий проникновению хлорид-ионов в бетон конструкции, рядом исследователей [29–31, 41, 44] был сделан вывод, что «инкубационный» период работы защитного покрытия (до инициации коррозии, в течение которого хлориды проникают через защитный слой бетона и начинают воздействовать на металл арматуры)

играет ключевую роль в прогнозировании срока службы конструкции. Исследования [2, 10, 18] также продемонстрировали, что срок службы бетонной конструкции при воздействии хлоридсодержащей среды зависит от толщины защитного слоя бетона и концентрации хлоридов в цементе больше, чем от коэффициента диффузии и критического уровня хлоридов в морской воде.



Рис. 4. Стадии развития коррозионных процессов в арматуре

Для вероятностной оценки коррозии арматуры исследователем этого явления *Bob C.* [32] было предложено использовать коэффициент безопасности, определяемый для инкубационного периода формулой $C_0 = c/c_a$, где c_a – средняя глубина проникновения хлоридов.

Данные обследования шести ж/б конструкций, эксплуатировавшихся 18-40 лет и расположенных вдоль побережья Северного моря в Нидерландах [40], демонстрируют значительное проникновение хлоридов с большим разбросом в пределах относительно небольших испытанных площадей. Однако визуальный осмотр выявил следы коррозионных повреждений (пятна ржавчины, растрескивание, выкрашивание) лишь на части сооружений. Поляризационная и флуоресцентная микроскопия показала хорошее качество перемешивания сырья, уплотнения и твердения, высокую степень однородности массива бетона. Но, как оказалось, конструкции, подверженные коррозионному воздействию, в результате технологических отклонений при изготовлении получили минимальную толщину защитного слоя 20–25 мм, в то время как у конструкций без видимых признаков коррозии толщина защитного слоя составляла более 30 мм и в отдельных элементах даже достигала 70 мм.

С помощью программного комплекса STRUREL был проведен полновозрастной расчет надежности гидротехнических сооружений для зоны периодического смачивания [38]. При одинаковой величине критической концентрации хлоридов (0,6% от массы вяжущего) в бетоне уровень надежности конструкции с толщиной защитного слоя 65 мм на отрезке времени от 0 до 100 лет превосходил уровень надежности конструкции с толщиной защитного слоя 50 мм. Ключевым моментом являлось то, что достигнутая надежность со временем снижалась из-за продвижения фронта активации хлоридов. Финансовый анализ затрат на строительство в конечном итоге показал выгоду увеличения толщины защитного слоя бетона (в результате чего возрастет стоимость строительства) за счет уменьшения затрат на ремонты и техническое обслуживание объектов.

Исследование влияния толщины защитного слоя бетона на коррозию арматуры вследствие его препятствия продвижению влаги и кислорода к арматуре по данным экспериментов на образцах продемонстрировано в работе [21]. Здесь опытные образцы, имеющие различную величину защитного слоя (10 и 15 мм), в течение 40 дней были загружены сосредоточенной нагрузкой на специальном испытательном стенде и смачивались водой 1 раз в сутки; для ускорения коррозии в бетонный раствор была добавлена поваренная соль в количестве 5% от массы вяжущего. Результаты эксперимента продемонстрировали существенное снижение интенсивности коррозии с увеличением величины защитного слоя.

Также в лабораторных условиях было исследовано поведение железобетонных образцов с неизменяемыми физико-механическими характеристиками в агрессивной среде с целью оценить зависимости: сцепления арматуры с бетоном – степени коррозионного повреждения арматуры – деформационно-прочностных характеристик конструкции [23]. Испытаниям подвергались образцы, отличающиеся друг от друга количеством и диаметром арматурных стержней, а также величиной защитного слоя, которые помещались в резервуар с 5% раствором *NaCl*. Эксперимент продолжался до появления на поверхности бетона продольной раскалывающей трещины (шириной 0,1–0,7 мм). Результаты исследования показали, что соотношение *c/d* (защитный слой бетона/диаметр арматуры) для конструкций, находящихся в условиях электрохимической коррозии, оказывает влияние на ширину раскрытия продольных трещин.

Углубленное рассмотрение вопроса образования трещин под давлением продуктов коррозии [39] позволило установить условия для инициирования и развития трещин, зависящие от соотношения *c/d* (табл. 1).

Таблица 1

Условия возникновения и распространения трещины

Стадия развития трещины	Уравнение
Инициирование	$\frac{\sigma_c}{f_t} = \frac{\left(\frac{c}{d}\right)^2 + \frac{c}{d}}{\left(\frac{c}{d}\right)^2 + \frac{c}{d} + 0,5}$
Развитие	$\frac{\sigma_c}{f_t} = \frac{0,5 + \frac{c}{d}}{1,665}$
Достижение трещиной поверхности	$\frac{\sigma_c}{f_t} = 2\left(\frac{c}{d} + 0,5\right)$
<i>Примечание:</i> σ_c – внутреннее давление от продуктов коррозии, f_t – прочность бетона на растяжение, d – диаметр арматуры, c – толщина защитного слоя.	

В качестве одной из основных причин изменения механических свойств и потери работоспособности ж/б конструкций в суровых морских условиях эксплуатации был назван выход из строя защитного слоя вследствие наличия в нем микротрещин, обусловленных разницей в плотности заполнителя и окутывающей его матрицы раствора на границе раздела фаз [43].

Таким образом, исследование работы защитного слоя бетона и влияние его величины и состояния на коррозионную стойкость железобетонной конструкции является первым шагом при разработке общей модели взаимодействия армированного конструкционного элемента МГТС с агрессивной хлоридсодержащей средой. Накопление данных натуральных, экспериментальных и теоретических исследований защитного слоя бетона способствует лучшему пониманию его роли в продолжительности инкубационного периода и характере коррозионных повреждений. Важное место при выполнении поставленной задачи отводится организации и проведению инженерно-технического мониторинга строящихся и существующих ж/б конструкций МГТС.

Определение коррозионного износа по результатам мониторинга состояния защитного слоя

Наиболее точным методом определения степени коррозионного повреждения арматуры является извлечение образцов арматуры и последующие лабораторные испытания. Однако нарушение целостности даже одного арматурного стержня может привести к значительному снижению несущей способности, что говорит о нецелесообразности данного метода. В связи с этим все большую актуальность приобретают неразрушающие инструментальные методы контроля поверхностного состояния защитного слоя бетона.

Анализ содержания публикаций [17, 38], посвященных данному вопросу, показывает преобладание в таких исследованиях импульсного вихретокового и электромагнитного (обычно называемого георадаром) методов. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, зависящие от схемы армирования. Приборы, работающие по первому принципу, точно измеряют защитный слой на глубину до 100 мм, если известен диаметр арматурного стержня, при этом их показания зависят от массы стали и не зависят от свойств бетона. Показания приборов, работающих по второму принципу, зависят от диэлектрической проницаемости бетона, не зависят от массы стали и хорошо зарекомендовали себя на глубине защитного слоя до 200 мм, а также при расстоянии между стержнями арматуры более 80 мм.

Также разрабатываются и совершенствуются методики применения датчиков измерения сопротивления поляризации, способных измерять скорость коррозии арматуры как на поверхности бетона, так и с помощью встроенных зондов. В частности, подобные датчики были установлены на Tauranga Bridge в Новой Зеландии на участках с низкой толщиной защитного слоя для снижения собственного веса [38]. Установка датчиков способствовала раннему предупреждению о проникновении хлоридов, что служило основанием для исполнения профилактических мероприятий по укреплению защитного слоя бетона.

Перспективным методом контроля сохранности защитных свойств бетона по отношению к арматуре без нарушения сплошности конструкции является представленный в статье [17] метод удельного электрического сопротивления поверхностного слоя бетона (рис. 5).

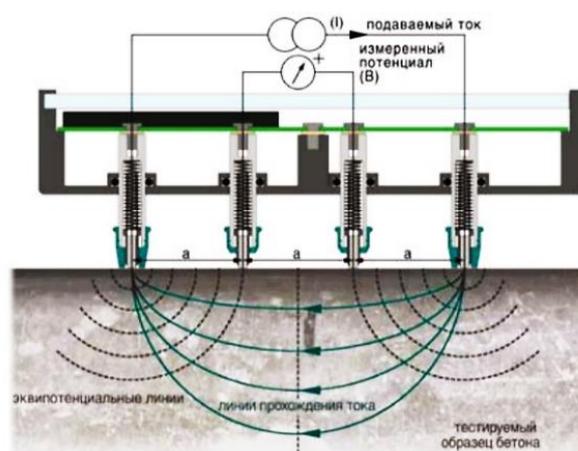


Рис. 5. Измерение удельного электрического сопротивления прибором Resipod [17]

Зная об обратной зависимости между объемной долей водонасыщения и удельным электрическим сопротивлением пористого материала ρ , можно установить такие показатели, как связность пор и сопротивление бетона проникновению жидких и газообразных веществ. Проведенные лабораторные и экспериментальные исследования позволили установить взаимосвязь между ρ и вероятностью возникновения коррозии арматуры (см. табл. 2). Применение метода в 2011 г. для обследования крыши здания Курского вокзала (г. Москва) позволило выявить соответствие между измеренными значениями сопротивления и фактическим состоянием арматуры, что говорит о его целесообразности как минимум для снижения количества участков нарушения целостности конструкции.

Таблица 2

Пороговые значения удельного электрического сопротивления

Удельное электрическое сопротивление, кОм*см	Вероятность возникновения коррозии
$\rho \geq 12$	Коррозия маловероятна
$8 \leq \rho \leq 12$	Коррозия вероятна
$\rho \leq 8$	Вероятность коррозии высока

К сожалению, перечисленные способы инструментальной оценки изменения технического состояния весьма трудоемки и дорогостоящи. А так как объективной характеристикой изменения технического состояния ж/б конструкций при коррозии арматуры является наличие визуальных внешних признаков нарушения сплошности бетона, в качестве показателя технического состояния ж/б конструкций посчитали целесообразным использовать ширину раскрытия коррозионных продольных трещин. Была предложена методика оценки степени коррозии арматуры по величине раскрытия δ продольной трещины в защитном слое [7]. Так как в результате образования продуктов коррозии на арматуре происходит ее отжатие в сторону наименьшего сопротивления (защитного слоя), а слой бетона с противоположной стороны практически не деформируется, то защитный слой был представлен в виде балочки прямоугольного сечения, нагруженной в пролете и заделанной на опорах (рис. 6).

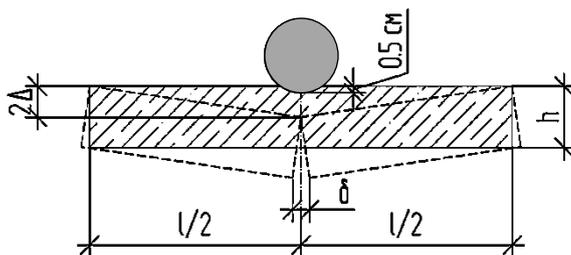


Рис. 6. Схема разрушения защитного слоя при коррозии арматуры [7]

В результате была получена зависимость между глубиной коррозии и величиной раскрытия трещины:

$$\Delta = \frac{\delta \times l}{4h}, \quad (2)$$

где Δ – глубина коррозии арматурного стержня, мкм; δ – ширина раскрытия трещины в защитном слое; l – длина балки (участка отслоения); h – величина защитного слоя с полусантиметровым запасом (так как исследования показывают, что отрыв защитного слоя происходит обычно несколько выше нижней точки сечения арматуры).

Была выявлена достаточная степень сходимости теоретических данных о глубине коррозионного износа, определенного по формуле (2), с результатами независимого натурального эксперимента, что говорит о возможности оценки коррозионного износа арматуры при раскрытии трещины до 1 мм (наиболее часто встречающийся случай при проведении обследований) без вскрытия поверхности элемента.

Моделирование равномерно прокорродированного стержня в виде полуплоскости с круговым вырезом, контур которого находится под воздействием равномерно распределенного давления [5], позволило уточнить толщину h и длину l балочки:

$$h = \frac{d^2 - R^2}{d}, \quad (3)$$

$$l = 2h \times \sqrt[3]{\frac{\pi \times (1 + \nu)}{1 - \frac{R^2}{d}}}, \quad (4)$$

где d – расстояние от поверхности конструкции до оси арматурного стержня, R^2 – радиус стержня, ν – коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона).

Приведенное значение ширины раскрытия трещины, учитывающее ее кривизну, было предложено определять с помощью фотофиксации участков с раскрытой продольной трещиной непосредственно после ее затирки составом, контрастным к общему фону света, с последующим масштабированием изображения [22]:

$$a_{crc}^{red} = a_{crc} \times \cos\left(\arctg \sqrt{\frac{l_{crc}^2 - l_0^2}{4n \times c}}\right), \quad (5)$$

где a_{crc} – измеренная ширина раскрытия трещины, l_{crc} – среднее значение длины берегов трещины, l_0 – длина участка поверхности измеряемой трещины, n – показатель линейности трещины, c – величины защитного слоя бетона.

Формулы (2–5) достаточно просты и удобны в практическом применении, а также учитывают отношение диаметра арматуры и толщины защитного слоя бетона (в том числе для конструкций с переменной величиной защитного слоя), что обуславливает целесообразность их применения для контроля коррозионных повреждений конструкции.

Следует отметить, что в реальных ж/б конструкциях нельзя избежать появления трещин на поверхности бетона за счет действия разного рода физико-химических механизмов (в том числе внешних нагрузок, сдерживающей усадки, внутреннего расширения и т. п.). Циклические нагрузки, вызывающие интенсивное перераспределения напряжений с бетона на арматуру, нарушение сцепления между ними и накопление остаточных деформаций в ж/б элементах, приводят к образованию поперечных (нормальных) трещин в защитном слое бетона [34], способствуя проникновению различных типов потенциально агрессивных агентов. На основе данных, полученных при длительных испытаниях прямых моделей ж/б конструкций в условиях воздействия хлоридов и циклической нагрузки, была разработана методика оценки технического состояния конструкции по ширине нормальной трещины [14], в основе которой лежит математическая зависимость глубины и длины коррозионного поражения арматуры в зоне влияния поперечной трещины от ширины ее раскрытия (рис. 7.)

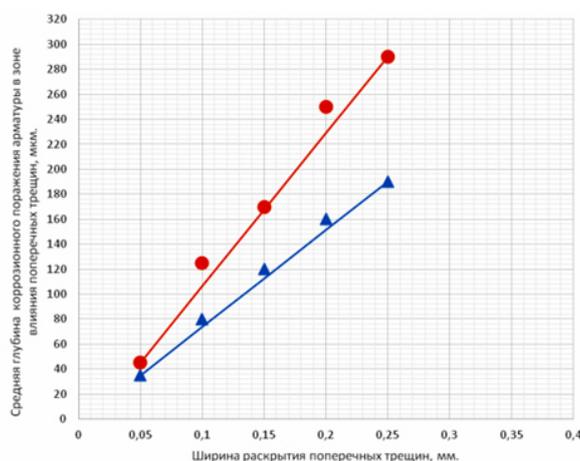


Рис. 7. Зависимость глубины коррозионного поражения арматуры от ширины раскрытия поперечных трещин [14]

В методике прогнозирования степени коррозионных повреждений [33], основанной на анализе ширины раскрытия трещины на поверхности конструкций методом конечных элементов (рис. 8), была использована математическая зависимость ширины раскрытия трещины от величины защитного слоя бетона, диаметра стальной арматуры и механических свойств бетона.

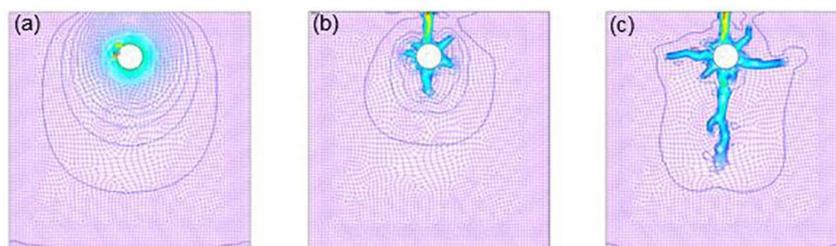


Рис. 8. Стадии растрескивания железобетона:
 а) появление очага трещины; б) зарождение трещины; в) распространение трещины [33]

Сравнение с экспериментальными данными из тематических исследований коррозии в естественных условиях продемонстрировало эффективность предложенного метода и необходимость проведения большего числа подобных исследований.

Таким образом, осуществление мониторинга за состоянием защитного слоя бетона позволяет прогнозировать степень коррозионного повреждения арматуры, оценивать техническое состояние, а также верифицировать новые теоретические зависимости. При этом следует учитывать, что достоверность такого прогноза зависит от влияния множества факторов, оказывающих действие на железобетонные конструкции гидротехнических сооружений, эксплуатируемых в морской среде. Одним из таких факторов, характерных для условий дальневосточных морей и оказывающих непосредственное влияние на состояние защитного слоя, является ледовая абразия.

Влияние ледовой абразии на разрушение защитного слоя бетона

Наличие дрейфующего ледяного покрова в месте эксплуатации МГТС обуславливает формирование ледовых нагрузок и воздействий на сооружение, которые, как правило, являются определяющими при проектировании. Ледовые нагрузки и воздействия возникают при горизонтальных перемещениях льда под действием ветра, течений, приливов, температурных деформаций, вертикальных перемещениях при колебании уровня моря, обледенении конструкций [3].

Одним из таких воздействий является ледовая абразия, то есть истирание материала конструкции под действием подвижек льда, обусловленная его адгезионными и фрикционными свойствами (рис. 9). Результатом ледовой абразии является повреждение материала конструкции в зоне истирания, деградация цементного камня, увеличение пористости и снижение прочности, а также создание благоприятных условий для сульфатной коррозии бетона, хлоридной коррозии арматуры и снижение сопротивляемости циклам замораживания и оттаивания, что в конечном итоге приводит к разрушению конструкции [16].

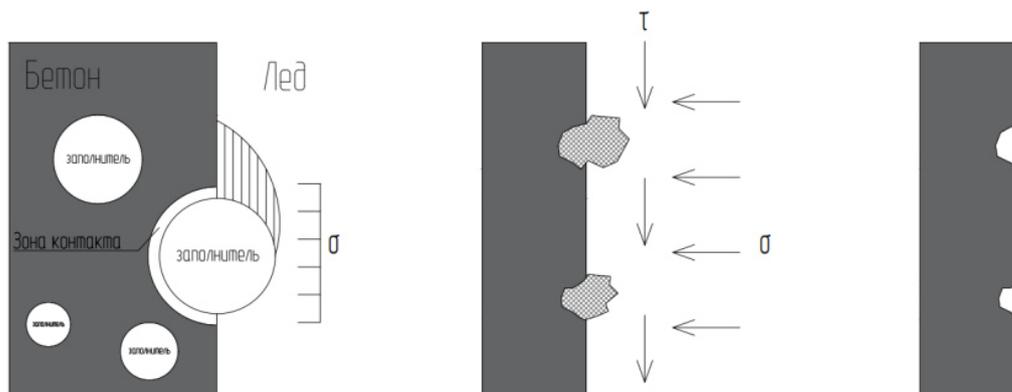


Рис. 9. Механизм действия ледовой абразии [28]

Согласно результатам оценки истираемости образцов дорожного бетона, увеличение истирания до уровня $0,75 \text{ г/см}^2$ приводит к полной потере способности противостоять комплексному морозно-солевому воздействию [27]. Экспериментально установлено, что независимо от состава и марки бетона процесс истирания можно условно разделить на три стадии (табл. 3) [37].

Так как на первых двух стадиях глубина абразии является незначительной, наибольший интерес с точки зрения износоустойчивости сооружения представляет исследование интенсивности абразии в устойчивой области. Как показал анализ исследований [4, 8, 28, 36, 42], основными параметрами, влияющими на интенсивность абразии, являются температура льда и скорость его движения, длина пути истирания, контактное давление, сопротивление материала ледовой абразии, параметры инженерного сооружения, механические свойства конструкции, а также качество поверхностного слоя (микротвердость и твердость)

Стадии истирания бетона

Стадия истирания	Длина истирания, км	Интенсивность абразии, мм/км	Средняя глубина абразии, мм	Характеристика
Поверхностная область	до 2	~0,14	до 0,27	Истирается только цементный камень
Область переходного режима	2..7	~0,07	до 0,61	На поверхности контакта образца со льдом частично оголяется крупный заполнитель
Устойчивая область	более 7	~0,05	более 0,61	Увеличивается открытая область крупного заполнителя, и он начинает истираться

Следует отметить, что шельфовые гидротехнические сооружения дальневосточных морей нередко эксплуатируются в ледовых условиях различной интенсивности, что требует оценки глубины ледовой абразии. Но вследствие большого разброса физико-механических характеристик льда и недостаточности данных натуральных и экспериментальных исследований сопротивляемости бетона истиранию проблема ледовой абразии остается нерешенной. К тому же нормативные документы не регламентируют способы оценки величины истирания и требования к износостойкости конструкционных материалов.

Следовательно, для решения проблемы ледовых воздействий необходимо разрабатывать и внедрять математический аппарат для расчета глубины ледовой абразии. Методы, основанные на математическом моделировании воздействия ледовых образований на причальные и шельфовые сооружения [8, 28], целесообразно применять для учета фактора истирания защитного слоя бетона при обеспечении коррозионной стойкости МГТС.

Заключение

В статье на основании анализа материалов публикаций по исследуемой теме показано, что создание долговечных конструкций МГТС является сложной комплексной проблемой, наличие которой связано с недостатками расчетных методик, конструктивных решений и организационно-технологических мер, комплексно обеспечивающих коррозионную стойкость железобетонных элементов, поскольку на данном этапе невозможно расчетным путем практически учесть влияние всех факторов, ее определяющих.

Анализ результатов исследований по данной проблеме показал также, что при оценке состояния гидротехнических сооружений, эксплуатируемых в морях с тяжелой ледовой обстановкой, необходимо учитывать, как минимум, четыре фактора, оказывающих влияние на инициацию и развитие процессов коррозии арматуры в приповерхностной зоне опор МГТС, контактирующих со льдом:

- снижение сцепления поверхности арматуры с бетоном при периодическом замораживании – оттаивания бетона в зоне переменного уровня при изменении температуры окружающего воздуха;
- уменьшение толщины защитного слоя бетона за счет истирания поверхности опоры МГТС в результате трения льда кромки дрейфующего ледового поля;
- влияние микровибраций от воздействия льда на выступающие элементы бетонной поверхности и выкрашивание крупных и мелких частиц из поверхности бетона опоры;
- влияние макровибраций от действия циклического разрушения льда при прорезании опорой сооружения ледового поля.

В связи с этим накопление данных натуральных, экспериментальных и теоретических исследований работы защитного слоя бетона, его роли в продолжительности инкубационного

периода, характере коррозионных повреждений является первостепенной задачей для разработки общей модели прогнозирования коррозионной стойкости ж/б элементов МГТС. Важное место при выполнении поставленной задачи, наряду с учетом всех научных достижений в данной области должны занимать организация и проведение инженерно-технического мониторинга в процессе эксплуатации МГТС, в частности контроль за состоянием защитного слоя бетона совокупностью инструментальных и косвенных методов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев С.Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Стройиздат, 1968. 232 с.
2. Алексеев С.Н., Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной среде. Москва: Стройиздат, 1976. 205 с.
3. Беккер А.Т., Ким Л.В. Безопасность шельфовых сооружений при воздействии дрейфующих ледяных образований // Наука и безопасность. 2015. № 2(15). С. 79–88.
4. Беккер А.Т., Уварова Т.Э., Помников Е.Е., Фарафонов А.Э., Тютрин Р.С. Экспериментальное исследование сопротивления бетона ледовой абразии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 4. С. 30–39.
5. Бенин А.В., Невзоров Н.И. Оценка коррозионного износа арматуры в железобетонных элементах по величине раскрытия трещин в защитном слое бетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2007. № 3. С. 48–52.
6. 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.
7. Васильев А.И. Оценка коррозионного износа рабочей арматуры в балках пролетных строений автодорожных мостов // Бетон и железобетон. 2000. № 2. С. 20–23.
8. Зверев А.А., Беккер А.Т., Уварова Т.Э., Беляева Т.Д. Методика математического моделирования ледовых истирающих воздействий на причальные сооружения // International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies. 2021. № 2. С. 36–51.
9. Ким Л.В. Обследование гидросооружений: монография. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2014. 140 с.
10. 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: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2020. 90 с.
11. Леонович С.Н., Черноиван В.Н., Снежков Д.Ю., Полейко Н.Л., Цуприк В.Г., Ким Л.В. Обследование сооружений / Инженерная школа ДВФУ. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2017. 85 с.
12. Малюк В.В., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Морские гидротехнические сооружения: деградационный и внезапный отказ конструкционного бетона // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: сборник научных статей XXI международного научно-методического семинара. 2018. С. 328–333.
13. Малюк В.В., Малюк В.Д., Леонович С.Н. Методика обследования железобетонных конструкций портовых сооружений (о. Сахалин) // Бетон и железобетон. 2021. № 5-6. С. 67–72.
14. Мигунов В.Н. Методика оценки влияния ширины расчётных поперечных трещин в изгибаемых железобетонных элементах на величину раскрытия коррозионных продольных трещин в условиях воздействия хлоридсодержащей среды и эксплуатационной нагрузки // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2016. № 3. С. 44–47.
15. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.И., Гузеев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. Москва: Стройиздат, 1980. 536 с.
16. Политько В.А., Кантаржи И.Г., Мордвинцев К.П. Ледовые нагрузки на морские гидротехнические сооружения: учебное пособие. Москва: Изд-во Моск. гос. строит. ун-та, 2016. 88 с.
17. Пузанов А.В., Улыбин А.В. Методы обследования коррозионного состояния арматуры железобетонных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 7(25). С. 18–25.

18. Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости. Москва: Центр проектной продукции в строительстве, 2006. 520 с.
19. Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Проблемы хлоридной коррозии стальной арматуры // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. № 4. С. 174–185.
20. Сайфидинов Б., Близнацова М.М. Особенности реконструкции и ремонта гидротехнических сооружений под водой // Евразийский союз ученых. 2021. № 1(82). С. 32–35.
21. Смоляго Г.А., Крючкова А.А., Дрокин С.В., Дронов А.В. Исследование аспектов хлоридной коррозии железобетонных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 2. С. 22–24.
22. Степанов В.Б. Методика определения ширины раскрытия коррозионных трещин для оценки технического состояния железобетонных конструкций // Magazine of Civil Engineering. 2012. № 5. С. 6–11.
23. Степанов В.Б., Мельков Б.Н., Белов В.В. Экспериментальное исследование зависимостей: степень коррозии арматуры – сцепление арматуры с бетоном – прочность и жесткость железобетонных конструкций, подверженных коррозии арматуры // Труды Псковского политехнического института. Псков: Изд-во ППИ, 2010. С. 128–138.
24. Ступаченко П.П. Структурная пористость и проницаемость цементного камня в бетоне // Известия вузов. Сер. «Строительство и архитектура». Новосибирск, 1958. С. 30–40.
25. Ступаченко П.П., Ефименко Ю.В., Цуприк В.Г. Структура, свойства и долговечность материалов на основе минеральных вяжущих: монография. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1992. 139 с.
26. Ступаченко П.П., Холошин Е.П., Антропова В.А. Долговечность гидротехнических железобетонных сооружений на побережье Дальнего Востока. Владивосток, 1987. 78 с.
27. Толмачев С.Н., Кондратьева И.Г., Чугуенко А.Н., Гринченко Р.О. Взаимосвязь истираемости и морозостойкости дорожных бетонов // Вестник ХНАДУ. 2005. № 30. С. 207–210.
28. Уварова Т.Э. Истирающее воздействие ледяного покрова на гидротехнические сооружения. Т. 1. Аналитический обзор. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2011. 120 с.
29. Цуприк В.Г. Прочность и долговечность бетона и железобетона морских гидротехнических сооружений в условиях Дальнего Востока: монография. Владивосток: Дальнаука, 1994. 327 с.
30. Шалый Е.Е. Анализ деградации бетона сооружений на острове Сахалин // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2018. № 1(34). С. 65–76. DOI 10.5281/zenodo.1196709
31. Шалый Е.Е., Леонович С.Н., Ким Л.В. Исследование процессов и механизма коррозии шельфовых сооружений острова Сахалин // Проблемы современного бетона и железобетона. 2017. № 9. С. 476–495.
32. Bob C. Probabilistic assessment of reinforcement corrosion in existing structures. *Concrete in the service Mankind, Concrete repair rehabilitation and protection. E and FN SPON*. London, 1996. P. 17–28.
33. Castorena-González J.H., Martin U. Modeling Steel Corrosion Failure in Reinforced Concrete by Cover Crack Width 3D FEM Analysis. *Frontiers in Materials*. 2020;(7):10.
34. Chuanqing F., Xianyu J. and Nanguo J. Modeling of Chloride Ions Diffusion in Cracked Concrete. *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*. 2010. P. 3579–3589.
35. Ho D.W.S. Durability of Concrete. *The Civil Engineering Handbook. Second edition*. CRC Press LLC, 2003. P. 1337–1349.
36. Huovinen S. Abrasion of concrete by ice in arctic sea structure. *AC: Materials Journ*. 1990. P. 266–270.
37. Itoh Y., Yoshida A., Tsuchiya M. An Experimental Study on Abrasion of Concrete Due to Sea Ice. *Presented at the 20th Annual Offshore Technology Conf*. Houston, Texas, 1988. P. 61–68.
38. Klinghoffer O. Durability Design Using Risk Assessment and Monitoring. *Journal of Nondestructive Testing (NDT). FORCE Technology*. Broendby, Denmark, 2012. 11 p.
39. Li K. Durability modeling of reinforcement corrosion in cracked concrete structures. *International RILEM Symposium 5 on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur*. Northwestern University. Evanston, Illinois. 2004.
40. Polder R.B. Durability of marine concrete structures – field investigations and modelling, *Heron*. 2005;50(3):133-153.
41. Schiessl P. Corrosion of Steel in Concrete. Report of the TC60-CSC RILEM, Chapman and Hall. London, 1988.

42. Silva C.V., Zorzi J.E., Cruz R.C.D., & Dal Molin D.C.C. Experimental Evidence that Micro and Macrostructural Surface Properties Markedly Influence on Abrasion Resistance of Concretes. *Wear*. 2019. P. 422–423.
43. Thomas A. Holm, Theodore W. Bremner. State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments. Structures Laboratory, U.S. Army Engineer Research and Development Center. 2000. 116 p.
44. Truc O. Prediction of chloride penetration into saturated concrete – Multi species approach. PhD Thesis, Chalmers University and INSA. Goteborg (Sweden), Toulouse (France), 2000. 180 p.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2023. N 2/55

Building materials and productswww.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-2/86-101>

Patlay K., Tsuprik V.

KIRILL I. PATLAY, Postgraduate Student, patlai.ki@dvfu.ruVLADIMIR G. TSUPRIK, Doctor of Engineering Sciences, Professor, tsuprik.vg@dvfu.ru

Polytechnic Institute

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

The role of the concrete protective layer in ensuring the corrosion resistance of reinforced concrete structures of offshore hydraulic structures

Abstract. An analytical review of scientific publications in the field of research on the influence of the size and condition of the protective layer of concrete on damage to structures of offshore hydraulic structures caused by corrosion of steel reinforcement has been carried out. The general state of the problem of chloride corrosion of steel reinforcement is shown, modern methods for determining its corrosion wear based on the results of engineering and technical monitoring of the state of the protective layer are presented. Based on the above examples, the relevance of developing methods for predicting the corrosion resistance of reinforced concrete structures of offshore hydraulic structures in order to increase their service life is substantiated.

Keywords: offshore hydraulic structures, reinforced concrete, protective layer, chloride aggression, corrosion, ice abrasion

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

For citation: Patlay K., Tsuprik V. The role of the concrete protective layer in ensuring the corrosion resistance of reinforced concrete structures of offshore hydraulic structures. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(3):86-101. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Alekseev S.N. Corrosion and protection of reinforcement in concrete. 2nd ed., revised. and additional Moscow, Stroyizdat, 1968. 232 p. (In Russ.).
2. Alekseev S.N., Rozental N.K. Corrosion resistance of reinforced concrete structures in an aggressive environment. Moscow, Stroyizdat, 1976. 205 p. (In Russ.).
3. Bekker A.T., Kim L.V. Safety of offshore structures under the influence of drifting ice formations. *Science and safety*. 2015;(2):79-88. (In Russ.).
4. Bekker A.T., Uvarova T.E., Pomnikov E.E., Farafonov A.E., Tyutrin R.S. Experimental study of the resistance of concrete to ice abrasion. *GIAB*. 2014;(4):30-39. (In Russ.).
5. Benin A.V., Nevzorov N.I. Evaluation of corrosion wear of reinforcement in reinforced concrete elements by the size of crack opening in the protective layer of concrete. *Structural mechanics of engineering structures and facilities*. 2007;(3):48-52. (In Russ.).

6. Vavrenyuk S.V., Efimenko Yu.V., Vavrenyuk V.G., Farafonov A.E. The results of the study of the causes of the destruction of the concrete coating of the sea pier on the coast of the Sea of Japan. *Stroitel'nye materialy*. 2019;(11):37-41. (In Russ.).
7. Vasiliev A.I. Evaluation of corrosion wear of working reinforcement in beams of span structures of road bridges. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2000;(2):20-23. (In Russ.).
8. Zverev A.A., Bekker A.T., Uvarova T.E., Belyaeva T.D. Methods of mathematical modeling of ice abrasion effects on berthing facilities. *International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies*. 2021;(2):36-51. (In Russ.).
9. Kim L.V. Inspection of hydraulic structures: monograph. Vladivostok, FEFU, 2014. 140 p. (In Russ.).
10. Leonovich S.N., Stepanova A.V., Tsuprik V.G., Kim L.V., Gurinovich V.Yu. Durability of concrete under chloride aggression: monograph. Vladivostok, FEFU, 2020. 90 p. (In Russ.).
11. Leonovich S.N., Chernoiivan V.N., Snezhkov D.Yu., Poleiko N.L., Tsuprik V.G., Kim L.V. Inspection of structures. Vladivostok, FEFU, 2017. 85 p. (In Russ.).
12. Malyuk V.V., Leonovich S.N., Budrevich N.A. Offshore hydraulic structures: degradation and sudden failure of structural concrete. *Perspective directions of innovative development of construction and training of engineering personnel: collection of scientific articles of the XXI International Scientific and Methodological Seminar*. 2018. P. 328-333. (In Russ.).
13. Malyuk V.V., Malyuk V.D., Leonovich S.N. Methodology for the inspection of reinforced concrete structures of port facilities (Sakhalin Island). *Concrete and reinforced concrete*. 2021;(5-6):67-72.
14. Migunov V.N. Method for assessing the influence of the width of calculated transverse cracks in bent reinforced concrete elements on the magnitude of the opening of corrosion longitudinal cracks under the influence of a chloride-containing environment and operational load. *Technical regulation in transport construction*. 2016;(3):44-47. (In Russ.).
15. Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.I., Guzeev E.A. Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection. Moscow, Stroyizdat, 1980. 536 p. (In Russ.).
16. Politko V.A., Kantarzhii I.G., Mordvintsev K.P. Ice loads on marine hydraulic structures: a tutorial. Moscow, MGSU, 2016. 88 p. (In Russ.).
17. Puzanov A.V., Ulybin A.V. Methods for examining the corrosion state of reinforcement of reinforced concrete structures. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2011;(7):18-25. (In Russ.).
18. Rosenthal N.K. Corrosion resistance of cement concretes of low and very low permeability. Moscow, Center for design products in construction, 2006. 520 p. (In Russ.).
19. Rosenthal N.K., Chekhniy G.V. Problems of chloride corrosion of steel reinforcement. *Bulletin of the Research Center "Construction"*. 2022;(4):174-185. (In Russ.).
20. Saifidinov B., Bliznetsova M.M. Peculiarities of reconstruction and repair of hydraulic structures under water. *Eurasian Union of Scientists*. 2021;(1/82):32-35. (In Russ.).
21. Smolyago G.A., Kryuchkova A.A., Drokin S.V., Dronov A.V. Study of aspects of chloride corrosion of reinforced concrete structures. *Vestnik BSTU im. V.G. Shukhov*. 2014;(2):22-24. (In Russ.).
22. Stepanov V.B. Method for determining the width of corrosion cracks to assess the technical condition of reinforced concrete structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2012;(5):6-11. (In Russ.).
23. Stepanov V.B., Melkov B.N., Belov V.V. Experimental study of the dependencies: degree of corrosion of reinforcement - adhesion of reinforcement to concrete - strength and rigidity of reinforced concrete structures subject to corrosion of reinforcement. *Proceedings of the Pskov Polytechnic Institute*. Pskov, PPI, 2010, p. 128-138. (In Russ.).
24. Stupachenko P.P. Structural porosity and permeability of cement stone in concrete. *Izvestiya vuzov. Construction and Architecture*. Novosibirsk, 1958. P. 30-40. (In Russ.).
25. Stupachenko P.P., Efimenko Yu.V., Tsuprik V.G. Structure, properties and durability of materials based on mineral binders: monograph. Vladivostok, 1992. 139 p. (In Russ.).
26. Stupachenko P.P., Kholoshin E.P., Antropova V.A. Durability of hydraulic reinforced concrete structures on the coast of the Far East. Vladivostok, 1987. 78 p. (In Russ.).
27. Tolmachev S.N., Kondratieva I.G., Chuguenko A.N., Grinchenko R.O. The relationship of abrasion and frost resistance of road concrete. *Bulletin of KhNADU*. 2005;(30):207-210. (In Russ.).
28. Uvarova T.E. Abrasion effect of the ice cover on hydraulic structures. T. 1. Analytical review: monograph. Vladivostok, FEFU, 2011. 120 p. (In Russ.).
29. Tsuprik V.G. Strength and durability of concrete and reinforced concrete of marine hydraulic structures in the conditions of the Far East: monograph. Vladivostok, Dal'nauka, 1994. 327 p. (In Russ.).

30. Shaly E. The degradation processes of structures in Sakhalin Island. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2018;(1):65-76. (In Russ.). DOI 10.5281/zenodo.1196709
31. Shaly E.E., Leonovich S.N., Kim L.V. Study of the processes and mechanism of corrosion of offshore structures of Sakhalin Island. *Problems of modern concrete and reinforced concrete: collection of scientific articles*. 2017;(9):476-495. (In Russ.).
32. Bob C. Probabilistic assessment of reinforcement corrosion in existing structures. *Concrete in the service Mankind, Concrete repair rehabilitation and protection. E and FN SPON*. London, 1996, p. 17–28.
33. Castorena-González J. H., Martin U. Modeling Steel Corrosion Failure in Reinforced Concrete by Cover Crack Width 3D FEM Analysis. *Frontiers in Materials*. 2020;(7):10.
34. Chuanqing F., Xianyu J. and Nanguo J. Modeling of Chloride Ions Diffusion in Cracked Concrete. *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*. 2010, p. 3579–3589.
35. Ho D.W.S. Durability of Concrete. *The Civil Engineering Handbook. Second edition*. CRC Press LLC, 2003, p. 1337–1349.
36. Huovinen S. Abrasion of concrete by ice in arctic sea structure. *AC: Materials Journ.* 1990. №? P. 266–270.
37. Itoh Y., Yoshida A., Tsuchiya M. An Experimental Study on Abrasion of Concrete Due to Sea Ice. *Presented at the 20th Annual Offshore Technology Conf.* Houston, Texas, 1988, p. 61–68.
38. Klinghoffer O. Durability Design Using Risk Assessment and Monitoring. *Journal of Nondestructive Testing (NDT). FORCE Technology*. Broendby, Denmark, 2012. 11 p.
39. Li K. Durability modeling of reinforcement corrosion in cracked concrete structures. International RILEM Symposium 5 on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur. Northwestern University. Evanston, Illinois. 2004.
40. Polder R.B. Durability of marine concrete structures – field investigations and modelling. *Heron*. 2005;50(3):133–153.
41. Schiessl P. Corrosion of Steel in Concrete. Report of the TC60-CSC RILEM, Chapman and Hall. London, 1988.
42. Silva C.V., Zorzi J.E., Cruz R.C.D., & Dal Molin D.C.C. Experimental Evidence that Micro and Macrostructural Surface Properties Markedly Influence on Abrasion Resistance of Concretes. *Wear*. 2019, p. 422–423.
43. Thomas A. Holm, Theodore W. Bremner. State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments. Structures Laboratory, U.S. Army Engineer Research and Development Center. 2000. 116 p.
44. Truc O. Prediction of chloride penetration into saturated concrete – Multi species approach. *PhD Thesis, Chalmers University and INSA*. Goteborg (Sweden), Toulouse (France), 2000. 180 p.