

Шалый Евгений Евгеньевич, аспирант, Дальневосточный Федеральный Университет, г. Владивосток (Россия)

Леонович Сергей Николаевич, иностранный член РААСН, д-р техн. наук, профессор, декан строительного факультета, Белорусский национальный технический университет, г. Минск (Беларусь)

Ким Лев Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией МНОЦ «Арктика», ИШ Дальневосточный Федеральный Университет, г. Владивосток (Россия)

Evgeniy Shaly, postgraduate student, FEFU, Vladivostok (Russia)

Sergey Leonovich, foreign member of RAASN, DSc in Engineering Science, Full Professor, Dean of the Faculty of Civil Engineering, Belarusian National Technical University, Republic of Belarus, Minsk (Belarus)

Lev Kim, PhD in Engineering Science, Associate Professor, Head of R&D center «Arctic», School of Engineering FEFU, Vladivostok (Russia)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И МЕХАНИЗМА КОРРОЗИИ ШЕЛЬФОВЫХ СООРУЖЕНИЙ ОСТРОВА САХАЛИН

INVESTIGATION CORROSION PROCESSES AND MECHANISM OF THE OFFSHORE STRUCTURES ON SAKHALIN ISLAND

АННОТАЦИЯ

В последние годы в Российской Федерации уделяют большое внимание развитию шельфовых зон Арктики и Дальнего Востока. Это связано в первую очередь с интересом государства к добыче углеводородов и развитию Северного Морского Пути. Однако портовая инфраструктура этих регионов находится в крайне неудовлетворительном состоянии. Большинство портов Дальнего Востока имеют большой износ причальных сооружений, поэтому для решения задач по освоению шельфа нужно в первую очередь

реконструировать и отремонтировать гидротехнические сооружения уже существующих портов и портовых терминалов, а впоследствии заняться их модернизацией, расширением или строительством новых. Одним из главных условий обеспечения высокого качества и долговечности таких сооружений является учет природно-климатических особенностей места строительства как на стадии проектирования сооружения, так и во время его возведения, реконструкции или капитального ремонта. Поэтому инженеру-строителю всегда необходимо знать и учитывать специфику того района, где он строит сооружение. Шельфовая зона Дальнего Востока находится на стыке крупнейшего на планете материка и самого большого океана. Для климата характерна муссонная циркуляция воздушных масс. В среднем тут проходит около ста циклонов в год. Некоторые из них обуславливают продолжительную пасмурную погоду с обильным выпадением осадков в виде дождя и снега. Нет ничего удивительного, что в рассматриваемом районе при таких условиях происходит интенсивная коррозия материала конструкций гидротехнических сооружений. Авторами проведены исследования хлоридного разрушения морских гидротехнических сооружений (далее ГТС) острова Сахалин. Для определения особенностей конструкции сооружений и планирования работ по контрольно-инспекторскому обследованию проведен анализ проектной, исполнительной и эксплуатационной документации. Определены основные причины коррозионного разрушения ГТС острова Сахалин. Выполнен вероятностный расчет проникновения хлоридов и CO_2 в бетон защитного слоя ГТС в зоне переменного уровня воды. Выполнено сравнение вероятностного расчета содержания хлоридов и CO_2 на некоторой глубине с данными лабораторных исследований.

ABSTRACT

In recent years, the Russian Federation has paid much attention to the Arctic and the Far East shelf zones development. This is primarily aligned with the state's interest in hydrocarbon production and the growth of the Northern Sea Route. However, the port infrastructure of these regions is in an extremely unsatisfactory condition. Most of the Russian Far East

ports have a large depreciation of berthing facilities, therefore, for solving offshore development problems first of all necessary to reconstruct and repair the hydraulic structures of existing ports and port terminals, and then modernize them, expand or build new ones. One of the main factors for ensuring the high quality and durability of such facilities is the consideration of the natural and climatic features of the construction site, both at the design stage of the structure and during its erection, reconstruction or capital repairs. Therefore, civil engineer always has to know and take into account specifics of the area where construction site is. Far East shelf zone situated at the junction of the largest continent and the largest ocean on the planet. The climate is characterized by air masses monsoon circulation. On average, there are about a hundred cyclones per year. Some of them cause a prolonged overcast weather with heavy precipitation in the form of rain and snow. No wonder that there is an intensive corrosion of the hydraulic structures material in this area under consideration of these conditions. The authors carried out studies of chloride destruction of the offshore hydraulic structures (hereinafter referred as HS) of the Sakhalin Ports. To determine the features of the facilities design and the inspection survey work planning, was created analysis of the design, executive and maintenance documentation. Main causes of Sakhalin ports HS corrosive destruction were determined. A probabilistic calculation of the chlorides and carbonation penetration into the concrete of the HS protective layer in the variable water level zone was performed. A comparison of the probabilistic calculation of the chloride and CO_2 content at some depth with the data of laboratory studies was done.

Ключевые слова: коррозия, DuraCrete, хлоридная агрессия, карбонизация, шельфовые сооружения, долговечность.

Keywords: corrosion, DuraCrete, chloride aggression, carbonation, offshore structures, durability.

ВВЕДЕНИЕ

На железобетон влияет ряд атмосферных переменных, на которые может влиять климат. Основными переменными являются уровень углекислого газа (CO_2), температура воздуха

и влажность. Повышенная влажность может увеличить карбонизацию. Оптимальная относительная влажность для карбонизации составляет от 50% до 75%. Если бетон очень сухой ($RH < 40\%$), то CO_2 не может раствориться, и карбонизация не идет. Если он очень влажный ($RH > 90\%$), CO_2 не может попасть в бетон, и бетон соответственно карбонизироваться не будет. С другой стороны, серьезность воздействия морской среды на конструкцию значительно варьируется и зависит от таких факторов, как климат и местоположение. Кроме того, не менее важным аспектом является транспортный механизм, который необходимо учитывать. В сухой зоне хлоридные ионы более быстро переносятся в зону защитного слоя бетона процессами поглощения и гидратационного всасывания.

Потенциальная долговечность железобетона значительно повышается, если обеспечивается и контролируется адекватная толщина защитного слоя для арматуры. Для обеспечения достаточной защиты арматуры в морских условиях защитный слой бетона должен быть в районе от 50–75 мм. Снижение толщины защитного слоя является рискованным даже при использовании высококачественного бетона, так как дефекты, такие как трещины и пустоты, с возрастом становятся более значительными.

Основываясь на измерениях проникновения хлорида внутрь конструкций, эксплуатируемых в морском климате, можно сказать, что уровень концентрации хлорида, необходимый для активации коррозионных процессов, может быть достигнут на глубине арматуры в относительно короткие периоды. Например, при глубине защитного слоя 30–50 мм в зоне брызг уровень хлорида может превышать 0,4% веса цемента (обычно предполагаемый порог коррозии) [6, 12] уже в возрасте конструкции порядка 30 лет. Для той же конструкции в тех же условиях при глубине защитного слоя 60 мм бетон имеет срок службы 50 лет. Этим и оправдывается использование большей толщины защитного слоя (50–70 мм) в морском климате.

Европейский стандарт (EN206–1: 2000) предлагает минимальные требования к прочности путем применения максимального водоцементного соотношения на срок службы 50 лет в для обоих видов коррозии: коррозии, вызванной углеродом, и хлоридной

коррозии в морской воде, как представлено в таблице 1. Русский стандарт (СП 28.13330.2012) также дает минимальную прочность на сжатие бетонного материала и бетонного покрытия, необходимого для поддержания достаточной прочности на срок службы более 50 лет (таблица 1).

Таблица 1

Предельные значения состава и свойств бетона для конструкций, эксплуатируемых в прибрежной зоне на срок службы 50 лет

	Карбонизация		Хлоридная агрессия	
	EN206-1	СП 28.13330.2012	EN206-1	СП 28.13330.2012
Класс бетона	XC4	XC4)	XS3	XS3
Максимальное В/Ц	0,5	0,45	0,45	0,45
Минимальная прочность на сжатие (МПа)	30	35	35	45
Минимальный расход цемента (кг/м ³)	300	300	340	340
Минимальный защитный слой бетона (мм)	45	25	50	50

Однако несмотря на большое количество исследований в области долговечности железобетонных конструкций, проблема по-прежнему остается актуальной.

1. МЕХАНИЗМ КОРРОЗИИ

1.1. Карбонизация

Углекислый газ (CO₂), присутствующий в атмосфере, реагирует с портландцементным бетоном с образованием карбоната кальция, и этот процесс называется карбонизацией. Главным образом эффект карбонизации заключается в уменьшении щелочности среды в бетоне, что позволяет разрушать пассивную пленку на арматуре и тем самым инициировать коррозию, в свою

очередь приводя к расщеплению бетона и снижению прочности. Однако в морских условиях эффект карбонизации снижается, поскольку CO_2 не может проникать в насыщенный влагой бетон. Карбонизация протекает, когда углекислый газ из воздуха проникает в бетон и реагирует с гидроксидами, такими как гидроксид кальция, с образованием карбонатов. В реакции с гидроксидом кальция образуется карбонат кальция. Эта реакция снижает pH порового раствора до величины, при которой пассивная пленка на стали нестабильна. Процесс разрушает пассивированный слой, что приводит к иницированию коррозии.

1.2. Хлорид-индуцированная коррозия

Хлорид-индуцированная коррозия является одним из основных механизмов износа, влияющих на долгосрочную работу бетонных конструкций. Бетон обеспечивает физическую и химическую защиту арматурной стали от проникновения хлоридов, которые могут привести к дезактивации стали, что, в свою очередь, приводит к повышенному риску коррозии стали. Сопротивление проникновению хлоридов зависит от проницаемости бетона и толщины защитного слоя бетона. Целостность бетонного покрытия под эксплуатационной нагрузкой, с точки зрения трещинообразования и ширины раскрытия трещин, также влияет на устойчивость к проникновению хлоридов.

Хлориды могут присутствовать в материалах, используемых в исходной бетонной смеси, или могут поступать из внешнего источника, такого как морская вода, с помощью капиллярной транспортировки или ионной диффузии. Кислотные электролиты снижают pH и разрушают пассивную оксидную пленку, которая образуется на поверхности стали. Коррозия происходит тогда, когда существуют многочисленные анодные и катодные участки. В морских условиях для прибрежных сооружений, в зоне переменного уровня и зоне всплеска волн вода является основным электролитом. В подводной зоне гидротехнических сооружений коррозии не будет, так как для процесса коррозии необходимо присутствие кислорода.

Стальные стержни, используемые в качестве армирования в бетоне, покрыты тонким пассивным слоем оксида, который защищает их от кислорода и воды. Этот пассивный слой может поддерживаться только при высоком значении pH (например, $\text{pH} > 12$). Когда хлоридные ионы проникают в бетон, а затем накапливаются до критического уровня на поверхности стальной арматуры, защитный слой разрушается, процесс называется депассивацией. В результате на поверхности арматуры формируется электрохимическая ячейка, как показано на рисунке 1.

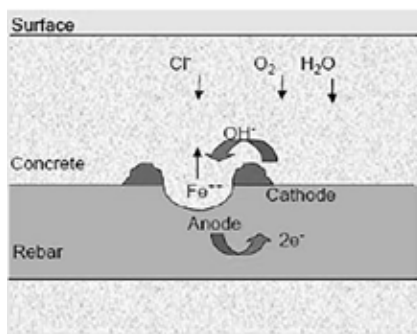


Рисунок 1. Электрохимическая ячейка на поверхности арматуры, вызванная проникновением хлорида

В процессе коррозии образуются два основных продукта ржавчины (коррозии) $\text{Fe}(\text{OH})_2$ и $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Эти продукты вызывают значительное расширение, что в конечном счете вызывает растрескивание, расслаивание и отслаивание защитного слоя бетона. Процесс отказа может быть дополнительно ускорен внешней нагрузкой.

Хлорид-индуцированная коррозия в основном зависит от трех факторов: коэффициента диффузии, концентрации хлоридов и критического уровня хлорида за пределами коррозии арматуры. Исследования, проведенные разными авторами [1, 9–15], показывают, что срок службы бетонной конструкции при воздействии хлоридной коррозии более чувствителен к глубине защитного слоя, чем коэффициент диффузии.

1.3. Совместное действие карбонизации и хлоридной агрессии

Не все хлориды, проникающие в бетон, имеют агрессивное коррозионное действие, поскольку цемент в бетоне способен связывать хлориды. У разных видов цемента эта способность отличается. Только так называемые свободные хлориды сводят на нет пассивный слой арматурной стали.

Влияние карбонизации на проникновение хлорида является сложным процессом, потому что в результате этого воздействия происходит очень много явлений [7]. Карбонизация подталкивает хлоридный фронт вперед, выделяя хлориды, которые были связаны в бетоне.

Не все хлориды, проникающие в бетон, имеют агрессивное коррозионное действие, поскольку цемент в бетоне способен связывать хлориды. Примечательно, что у разных видов цемента эта способность отличается. Только так называемые свободные хлориды сводят на нет пассивный слой арматурной стали. Отсюда следует, что фактической движущей силой хлоридов в бетоне является градиент свободных хлоридов. Помимо этого, выделение хлоридов влечет за собой увеличение содержания влаги в бетоне, что снова влияет на проницаемость бетона. Точное количество свободных хлоридов в бетоне трудно оценить, поскольку в обоих направлениях может наблюдаться медленный поток хлоридов в сторону неагированного бетона и из бетона [6].

В хлоридных средах проблема карбонизации считается менее важной, чем проникновение хлорида. Поэтому влияние хлоридов на карбонизацию интенсивно не изучалось. Однако, как показала практика эксплуатации железобетонных конструкций в прибрежной зоне, это воздействие все-таки нужно учитывать.

2. МОДЕЛЬ ДЕГРАДАЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИБРЕЖНЫХ СООРУЖЕНИЙ ОТ ДЕЙСТВИЯ ИОНОВ ХЛОРА

Модель деградации DuraCrete [1, 2] для коррозии, вызванной хлоридами, основана на концепции переноса хлорида в бетон путем диффузии и инициирования арматурной коррозии при

превышении содержания активного хлорида на поверхности стали. Диффузионное моделирование хлоридного раствора в бетоне было предложено в 1970-х годах и далее развивается по настоящее время [2].

Модель DuraCrete включает в себя формулировку предельного состояния для инициирования коррозии, вызванной хлоридом, которая упрощается путем указания того, что отказ (то есть инициирование коррозии) происходит при:

$$C > C_{crit} \quad (1)$$

где C – содержание хлорида на поверхности армирования, а C_{crit} – критическое содержание. Критическое содержание хлорида является сложной функцией конкретных свойств, в частности: pH, вода, кислород, наличие пустот, поэтому в настоящее время нет устоявшегося предельного значения концентрации хлорида, а есть, скорее, постепенное увеличение вероятности коррозии с увеличением содержания хлорида. Для эксплуатируемых конструкций (в отличие от лабораторных образцов) значение 0,4% хлоридного иона по массе цемента считается лучшим средним значением.

Согласно модели DuraCrete для переноса хлорида, содержание хлорида в стали $C(x, t)$ является зависимой от времени функцией, описываемой:

$$C_x = C_{sn} \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_a(t)t}} \right], \quad (2)$$

где C_x – содержание хлоридов на некоторой глубине в % от массы цемента;

C_{sn} – поверхностное содержание хлоридов в % от массы цемента;

x – глубина проникновения хлоридов, м;

t – время воздействия, с;

$D_a(t)$ – коэффициент диффузии хлоридов, м²/с.

Модель DuraCrete может применяться на этапе проектирования новых конструкций, однако применение модели

к практическим случаям является относительно новым. Для существующих структур некоторые входные параметры различны. Например, одним из входных параметров для модели является измеренное значение коэффициента диффузии 28-дневного бетона. Невозможно измерить это значение для бетона, которому уже 20, 30, 50 и более лет. С другой стороны, содержание хлоридов на поверхности, глубина защитного слоя и их статистическое распределение могут быть установлены экспериментально; поэтому их значения должны быть оценены экспериментально, и их не следует принимать так же, как на этапе проектирования.

Из сопоставления полевых результатов с предсказаниями модели DuraCrete с использованием уравнения (2) Rob V. Polder [4] предложил два отклонения от модели DuraCrete и ее входных параметров. Одно отклонение касается коэффициента окружающей среды. Первоначальный расчет включает в себя тип цемента, окружающую среду и продолжительность периода твердения. В последующем исследовании DuraCrete и использовании своей базы данных Gehlen предложил коэффициент окружающей среды для бетона в морской среде, основанный только на температуре [3]. Его основное соображение заключается в том, что в зонах прилива и всплеска влияние длительности активного периода твердения относительно невелико, поскольку бетон остается влажным из-за его естественного воздействия. Это было признано, и была принята формулировка Gehlen для коэффициента окружающей среды, рассчитанная по:

$$K_C = \exp \left[b_e \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_e} \right) \right] \quad (3)$$

где b_e – параметр регрессии;

T_{ref} – эталонной температуры (293 К);

T_e – среднегодовой температуры воздуха (К).

Это упрощение является привлекательным по сравнению с гораздо более сложной формулировкой исходной постоянной окружающей среды DuraCrete. Вместе с тем подчеркивается, что это упрощение допускается только в морских условиях.

Второе отклонение для DuraCrete касается временной зависимости коэффициента диффузии. Было предложено отклонение относительно значения показателя старения. Для цементного бетона DuraCrete дает значения в пределах от 0,6 до 0,8. Скорее всего, эти относительно высокие значения основаны на данных, полученных из связующих веществ, состоящих из портландцемента, который добавлялся отдельно во время бетонирования. Gehlen предлагает для прибрежных конструкций использовать значение 0,45 [3]. Принимая во внимание измененный коэффициент окружающей среды и показатель старения, Rob V. Polder [4] называет модель с предлагаемыми модификациями версией DuMaCon модели DuraCrete.

Для проверки этой расчетной модели авторами статьи использовались конструкции, эксплуатируемые в портах Сахалина (рис. 5). Была утверждена железобетонная конструкция на сульфатостойком портландцементе с водоцементным отношением 0,4 и расходом 450 кг/м³; толщина защитного слоя бетона составляет 50 мм. Согласно методологии DuMaCon, ведется вероятностный расчет содержания хлорида на определенной глубине в% от массы бетона на срок службы 40 лет. Результаты вероятностного расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3




Результаты вероятностного расчета

Исследованная конструкция	Период эксплуатации	X, mm	Cl %
Зона переменного уровня и зона брызг	40 лет	10	0,293
		20	0,22
		30	0,165
		40	0,120
		50	0,079

Результаты вероятностного расчета сравнивались с экспериментальными данными (табл. 4).

Результаты обследования прибрежных конструкций о. Сахалин

Конструкция	Место расположения	Год возведения	Тип цемента	Класс	C1 %	Глубина		Image
						1-10	10-30	
Стена причала	г. Холмск	1980	Поргланд-цемент	XS3	0,149	1-10	Image	
					0,085	10-30		
					0,082	30-50		
Стена причала	г. Корсаков	1981	Поргланд-цемент	XS3	0,162	1-10	Image	
					0,094	10-30		
					0,080	30-50		
Пешеходная эстакада (колонна)	г. Холмск	1983	Поргланд-цемент	XS3	0,20	1-10	Image	
					0,115	10-30		
					0,069	30-50		

Пешеходная эстакада (плита)	г. Холмск	1983	Порглад-цемент	XS3	0,253	1-10	
					0,241	10-30	
					0,089	30-50	
Надстройка пирса	г. Холмск	1980	Порглад-цемент	XS3	0,31	1-10	
					0,254	10-30	
					0,012	30-50	
Надстройка пирса	г. Корсаков	1981	Порглад-цемент	XS3	0,42	1-10	
					0,26	10-30	
					0,0125	30-50	

3. МОДЕЛЬ ДЕГРАДАЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИБРЕЖНЫХ СООРУЖЕНИЙ ОТ ДЕЙСТВИЯ КАРБОНИЗАЦИИ

Задача карбонизации бетонных конструкций может быть надлежащим образом изучена с использованием случайного процесса, вероятности и надежности для прогнозирования времени насыщения бетонными структурами углекислым газом. Изучение практической модели прогнозирования для карбонизации имеет важное значение для анализа долговечности и оценки срока службы бетонных конструкций.

Для расчета скорости карбонизации Schiessel [5] предложил следующее уравнение:

$$K = \sqrt{\frac{2D_{\dot{a}} \cdot C_{s,atm}}{m_c \cdot C_{CO_2} / 100}} \quad (3)$$

где $D_{\dot{a}}$ – константа конкретной диффузии, m^2 / c ; $C_{s,atm}$ – концентрация CO_2 в атмосфере, %; m_c – содержание цемента, кг; C_{CO_2} – представляет собой концентрацию CO_2 для переноса всех продуктов в карбонаты, mg/m^3 .

Эта модель была изменена Gehlen [3] и использует первый закон Фика:

$$x_c = \sqrt{2 \cdot k_{RH} \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot C_s \cdot \sqrt{t_{SL}} \cdot \left(\frac{t_0}{t_{SL}}\right)^{\frac{(P_{SR} \cdot T_{0W})^{b_w}}{2}}} \quad (4)$$

где x_c – глубина карбонизации, м; t_{SL} – срок службы или срок эксплуатации, год; k_{RH} – коэффициент упрочнения; ε_t – погрешность, вызванная ускоренной процедурой карбонизации, mm^2 .

Как и в случае с хлоридами, для проверки этой расчетной модели авторами статьи использовались конструкции, эксплуатируемые в портах Сахалина (рис. 5). Была утверждена железобетонная конструкция на сульфатостойком портландцементе с отношением водоцементным отношением 0,4 и расходом $450 \text{ кг}/m^3$;

толщина бетона защитного слоя составляет 50 мм, срок службы 100 лет. Результаты моделирования приведены таблице 5.

Таблица 5

Расчетная глубина карбонизации x_c и скорость v_k

Время эксплуатации	x_c и v_k	
	x_c , мм	v_k , мм/год
Северо-Восток		
10	10.54	1.0540
25	16.67	0.6668
30	18.26	0.6087
50	23.57	0.4714
100	33.33	0.3333
Восток		
10	12.970	1.297
25	20.500	0.820
30	22.460	0.749
50	28.996	0.580
100	41.010	0.410
Юго-Восток		
10	11.880	1.188
25	18.780	0.751
30	20.580	0.686
50	26.560	0.531
100	37.570	0.376

Таким образом, по результатам исследования можно сделать вывод, что в будущем, используя данные, полученные в ходе вероятностного моделирования, можно точно рассчитать срок службы бетона прибрежных структур в данной области и надежно определить возможность их работы без специальной (вторичной) защиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ механизма коррозионного разрушения шельфовых конструкций.
2. Сформулировано предельное состояние для химической реакции хлорида в защитном слое бетона шельфовых конструкций.
3. Проведены верификации расчетных моделей, принятых для вероятностного решения проблемы определения концентрации хлора и CO_2 в бетоне защитного слоя гидротехнических сооружений острова Сахалин.
4. Обследование гидротехнических сооружений Сахалина подтвердило, что локально в определенных случаях достигается максимальная концентрация хлоридов и возникает коррозия арматуры. Срок службы обследуемых сооружений не достигал проектного срока службы, но концентрация ионов хлорида в бетоне в зоне усиления, подвергнутой коррозионному разрушению, составила 0,3% по отношению к бетонной массе.
5. Проведено моделирование концентрации ионов хлора в защитном слое бетона в соответствии с принятыми моделями в зависимости от срока службы и климатических условий (глубина армирования 50 мм).
6. Проведено сравнение содержания хлорида на некоторой глубине при вероятностном расчете с лабораторными данными.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bazant Z. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures, part 1-theory, part 2-application. *J. Struct. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 1979. 105, ST6. pp. 1137-1166.
2. DuraCrete. Models for Environmental Actions on Concrete Structures // Document BE95-1347/R3. Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347. Gouda, 1999.
3. DuraCrete R17, 2000, DuraCrete Final Technical Report, Document BE95-1347/R17, May 2000, The European

- Union – Brite EuRam III, DuraCrete – Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures, includes General Guidelines for Durability Design and Redesign, Document BE95-1347/R15, February 2000, CUR, Gouda.
4. Gehlen C. Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken, Deutscher Ausschuss for Stahlbeton 510, Berlin, 2000.
 5. Polder, R.B., Visser, J., 2004, Redistribution of chloride in blended cement concrete during storage in various climates, 3rd RILEM Workshop Testing and Modelling Chloride Ingress into Concrete, Eds. C. Audrade, J. Kropp, PRO 38, RILEM SARL publications, ISBN 2-912143-48-9
 6. Schiessl, P. Corrosion of Steel in Concrete / P. Schiessl // Report of the TC60-CSC RILEM. Chapman and Hall. London, 1988. 154 p.
 7. Vesikari, E. Carbonation and Chloride Penetration in Concrete with Special Objective of Service Life Modelling by the Factor Approach Research report VTT-R-04771-09, 2009.
 8. Yoon, I-S. Deterioration of Concrete due to Combined reaction of Carbonation and Chloride Penetration: Experimental Study Key Engineering Materials. Vol. 348-349(2007). pp. 729-732.
 9. Леонович, С. Н. Алгоритм расчета долговечности железобетонных конструкций при хлоридной агрессии / С. Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: сб. тр. VII Междунар. науч.-методич. семинара; под ред. Н. П. Блещика, А. А. Борисевича, Т. М. Пецольда. – Брест: БрГТУ, 2001. – С. 432-435.
 10. Леонович, С. Н. Вероятностная оценка коррозии арматуры в существующих железобетонных конструкциях при хлоридной агрессии / С. Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: сб. тр. VII Междунар. науч.-методич. семинара; под ред. Н. П. Блещика, А. А. Борисевича, Т. М. Пецольда – Брест: БрГТУ, 2001. – С. 435-440.

11. Леонович, С. Н. Модели периода инициирования коррозии арматуры / С. Н. Леонович // Строительные материалы. – 2012. – С. 74-75.
12. Розенталь, Н. К. О максимально допустимом содержании хлоридов в бетоне / Н. К. Розенталь // Строительные материалы. – 2017. – С. 82-84.
13. Розенталь, Н. К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости / Н. К. Розенталь. – М.: Федеральное гос. унитарное предприятие «Центр проектной продукции в строительстве» (ФГУП ЦПП), 2006. – 520 с.
14. Розенталь, Н. К. Способ оценки коррозионного состояния стальной арматуры в железобетонных конструкциях / Н. К. Розенталь // Изучение стойкости железобетона в агрессивных средах; под. ред. В.М. Москвина, Ю.М. Савиной. – М.: Стройиздат, 1980. – С. 72-80.
15. Технический отчет по инженерно-экологическим изысканиям в Холмском Морском Торговом Порту / «ООО ПриМорПроектБюро». – Владивосток, 2015.

REFERENCES

1. Bazant Z. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures, part 1-theory, part 2-application. *J. Struct. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 1979. 105, ST6. pp. 1137-1166.
2. DuraCrete. Models for Environmental Actions on Concrete Structures // Document BE95-1347/R3. Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347. Gouda, 1999.
3. DuraCrete R17, 2000, DuraCrete Final Technical Report, Document BE95-1347/R17, May 2000, The European Union – Brite EuRam III, DuraCrete – Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures, includes General Guidelines for Durability Design and Redesign, Document BE95-1347/R15, February 2000, CUR, Gouda.
4. Gehlen C. Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken, Deutscher Ausschuss for Stahlbeton 510, Berlin, 2000. (de)

5. Polder, R.B., Visser, J., 2004, Redistribution of chloride in blended cement concrete during storage in various climates, 3rd RILEM Workshop Testing and Modelling Chloride Ingress into Concrete, Eds. C. Audrade, J. Kropp, PRO 38, RILEM SARL publications, ISBN 2-912143-48-9
6. Schiessl, P. Corrosion of Steel in Concrete / P. Schiessl // Report of the TC60-CSC RILEM. – Chapman and Hall. – London, 1988. – 154 p
7. Vesikari, E. Carbonation and Chloride Penetration in Concrete with Special Objective of Service Life Modelling by the Factor Approach Research report VTT-R-04771-09, 2009
8. Yoon, I-S. Deterioration of Concrete due to Combined reaction of Carbonation and Chloride Penetration: Experimental Study Key Engineering Materials. Vol. 348-349(2007). pp. 729-732.
9. Leonovich S.N. *Algoritm rascheta dolgovechnosti zhelezobetonnnykh konstrukciy pri khloridnoy agressii* [Algorithm for Calculating the Durability of Reinforced Concrete Structures in Chloride Aggression]. In: Prospects for the development of new technologies in the construction and training of personnel in the Republic of Belarus: BrFTU, 2001. pp. 432-435. (ru)
10. Leonovich S. N. *Veroyatnostnaya otsenka korrozii armatury v sushchestvuyushchikh zhelezobetonnnykh konstruktsiyakh pri khloridnoy agressii* [Probabilistic assessment of corrosion of reinforcement in existing reinforced concrete structures in chloride aggression]. In: Prospects for the development of new technologies in the construction and training of personnel in the Republic of Belarus: BrFTU, 2001. pp. 435-440. (ru)
11. Leonovich S. N. *Building Materials*. 2012. No. 9. pp. 74-75. (ru)
12. Rosental N.K. *Building Materials*. 2017. No. 1-2. pp. 82-84. (ru)
13. Rosental N.K. *Korrozionnaya stoykost tsementnykh betonov nizkoy I osobo nizkoy pronitsaemosti* [Corrosion resistance of cement concrete of low and particularly low permeability]. Moscow: FGUP TSPP, 2004. 520 p. (ru)
14. Rosental N.K. *Sposob otsenki korrozionnogo sostoyaniya stalnoy armatury v zhelezobetonnnykh konstruktsiyakh* [The method of

assessing the corrosion condition of steel reinforcement in reinforced concrete structures]. In: Study of the resistance of reinforced concrete in corrosive environments. Moscow: Stroiisdat, 1980. pp. 72-80. (ru)

15. Technical Report about Engineering - Environmental Surveys in Kholmsk Sea Commercial Port / «ООО РМРВ», Vladivostok, 2015. (ru)

Статья поступила в редколлегию 05.12.2017.