

УДК 691.328.1

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МОРСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ КОРРОЗИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Е. Е. Шалый¹, С. Н. Леонович², Л. В. Ким¹

¹Дальневосточный федеральный университет (г. Владивосток),

²Белорусский национальный технический университет (г. Минск)

Аннотация. Госпрограмма развития Северного морского пути и соответствующей портовой инфраструктуры в арктической зоне Российской Федерации сделали актуальной задачу повышения долговечности железобетонных сооружений, широко применяющихся при строительстве северных портов. Данные обследований показывают, что средний срок службы морских бетонных сооружений составляет 30 лет. Около 90 % из них имеют дефекты бетона в виде трещин и отколов и коррозии арматуры, которые снижают долговечность и несущую способность. В морских условиях наблюдаются основные дефекты защитного слоя бетона в начальный период 7-10 лет. При диагностике у 85 % отремонтированных сооружений в пределах 100 м от береговой линии снова через 5-10 лет зафиксированы признаки повторной деградации, что свидетельствует о неэффективности метода ремонта. Хлоридная агрессия – одна из главных причин коррозии арматуры бетонных конструкций, в основном шельфовых и прибрежных сооружений. Хлорид-ионы имеют наибольшую активирующую способность из всех видов анионов. Проникновение хлорид-ионов вследствие капиллярного всасывания и диффузии разрушает пассивирующую защитную пленку на арматуре, в результате происходит быстрое разрушение защитного слоя бетона.

В данном исследовании усовершенствована модель диффузии хлорид-ионов и разработано программное обеспечение для анализа долговечности. Выполнено моделирование концентрации ионов хлора по глубине защитного слоя бетона железобетонной конструкции в зависимости от условий ее эксплуатации. Требуется разработка оптимальных ресурсосберегающих схем ремонта для снижения общей стоимости конструкций. Предложена вероятностная методика прогнозирования срока долговечности морских сооружений при комбинированной коррозии от действия карбонизации и хлоридной агрессии. Одним из условий надежности морских сооружений является соответствие свойств материала конструкций природно-климатическим условиям района строительства. Задачей экспериментальных исследований являлось получение качественных характеристик, определяющих срок службы бетонных сооружений. Выполнена верификация модели для решения задачи определения концентрации хлора в защитном слое бетона гидротехнических сооружений. Проведены натурные и лабораторные исследования состояния портовой инфраструктуры южной части острова Сахалин в городах Холмск и Корсаков. Сравнивалось содержание хлоридов возле арматуры с предельным содержанием, то есть содержанием хлоридов, при котором начинается коррозия арматуры. Выполнены расчеты по моделям совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии, показавшие удовлетворительную сходимость.

Ключевые слова: коррозия; карбонизация; хлоридная агрессия; вероятность; отказ; индекс надежности.

1. Обоснование вероятностной модели коррозионных эффектов. Хлоридная агрессия является одним из факторов снижения долговечности бетонных конструкций. Под действием хлорид-ионов прочность защитного слоя железобетона постепенно уменьшается до тех пор, пока не произойдет обнажения арматуры с последующим катастрофическим

развитием событий. Данные воздействия описываются случайной величиной (функцией) и, как правило, не приводят к скачкообразному изменению прочности системы.

Деактивация стали арматуры увеличивает коррозию и, соответственно, уменьшает сечение, т.е. несущую способность арматуры. Сопротивление хлоридной агрессии зависит

от проницаемости бетона и толщины защитного слоя. Хлориды поступают из морской воды (электролит) путем капиллярной транспортировки или ионной диффузии. Кислотные электролиты нейтрализуют нормальное щелочное состояние бетона ($pH > 12,6$), разрушают пассивную оксидную пленку на поверхности арматуры.

В вероятностном подходе управляющие параметры задачи моделируются как случайные величины. В большинстве международных норм определяющей величиной требуемого запаса надежности конструкции является индекс надежности β . Он характеризует тот факт, что между сроком службы конструкции и средним сроком службы существует определенный запас. Этот запас зависит от требуемого уровня надежности, его типа распределения, его среднего значения и его отклонения от этой средней величины. Таким образом, индекс надежности β непосредственно связан с вероятностью отказа P_f :

$$P_f = \Phi(-\beta), \quad (1)$$

где Φ – кумулятивная функция стандартного нормального распределения, или функция Лапласа

$$P_f = \int_{-\infty}^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}u^2} du. \quad (2)$$

В общем виде основное уравнение вероятности отказа конструкций заключает в себе две функции: функцию S , которая характеризует внешние воздействия на конструкцию и функцию R , которая представляет собой сопротивление элементов конструкции этим воздействиям. Поскольку S и R характеризуются разбросом, то можно говорить лишь о вероятности ненаступления предельного состояния:

$$P_f = P(R - S \leq 0) \leq P. \quad (3)$$

Принимая во внимание уравнение (3), состояние элемента можно охарактеризовать через переменную Z :

$$Z = R - S. \quad (4)$$

Величина Z представляет надежность, с которой элемент соответствует требованиям по предельному состоянию. Таким образом, если R и S представляют собой случайные

величины, имеющие среднее значение (μ), стандартное отклонение (σ) и подчиняющиеся закону нормального распределения, то и Z также будет иметь среднее значение и стандартное отклонение, которые вычисляются по формулам

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S, \quad (5)$$

$$\sigma_Z = \sigma_R - \sigma_S. \quad (6)$$

Индекс надежности β – это средние значения и стандартные отклонения надежности Z [5]:

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z}. \quad (7)$$

Тогда вероятность отказа

$$P_f = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right). \quad (8)$$

Для хлоридной коррозии в вероятностной постановке S представляет собой значение концентрации хлоридов $C(x, t)$. Параметр R в уравнении (4) представляет собой эффект сопротивления C_{crit} , который является критической (пороговой) концентрацией хлорида на уровне арматуры, превышение которого приводит к иницированию коррозии.

Исходя из этого, уравнение (4) можно выразить как

$$Z = C_{crit} - C(x, t). \quad (9)$$

Тогда вероятность отказа (3) будет иметь вид

$$P_f = P(C(x, t) \geq C_{crit}). \quad (10)$$

Условие, представленное уравнением (10), можно схематически изобразить с помощью функций плотности вероятности $C(x, t)$ и C_{crit} . Взаимодействие между двумя функциями плотности представляет вероятность отказа P_f .

В этом случае вероятность безотказной работы (3) будет определяться как

$$P_f = P(\{C_{crit} - C(x, t)\} \leq 0) \leq P. \quad (11)$$

Вероятность безотказной работы в уравнении (11) дается в стандартах долговечности и может определяться двумя способами.

Описание вероятностной модели. Для морских сооружений характерно совместное действие карбонизации и хлоридной агрессии. В ряде исследований [6, 8] получили различные коэффициенты диффузии хлоридных ионов в карбонизированных и не-

карбонизированных участках защитного слоя бетона (так называемый «скин-эффект»). Он заключается в изменении хлоридного профиля в одном срезе, что является следствием ремонтного восстановления защитного слоя бетона либо комплексного

действия нескольких агрессивных факторов среды.

Учитывая это явление, предлагается вычислять количество ионов хлорида карбонизированных и некарбонатных участков $Ccl_{cb}(x, t)$ и $Ccl_{ucb}(x, t)$ по формулам

$$Ccl_{cb}(x, t) = Cs \sum_{n=0}^{\infty} a^n \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{2 \cdot n \cdot X_c + x}{2 \sqrt{D_{cl,cb}(t) \cdot t}} \right) - a \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{(2n + 2) \cdot X_c - x}{2 \sqrt{D_{cl,cb}(t) \cdot t}} \right) \right], \quad (12)$$

$$Ccl_{ucb}(x, t) = \frac{2 \cdot k \cdot Cs}{k + 1} \sum_{n=0}^{\infty} a^n \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{(2n + 1) \cdot x + k \cdot (x - X_c)}{2 \sqrt{D_{cl,cb} \cdot t}} \right) \right], \quad (13)$$

$$a = \frac{1 - k}{1 + k}, \quad (14)$$

$$k = \sqrt{D_{cl,cb} / D_{cl,ucb}}. \quad (15)$$

Учитывая сопротивление между слоями,

$$Ccl_{ucb}(x, t) = \frac{2 \cdot k \cdot Cs \cdot R}{k + 1} \sum_{n=0}^{\infty} a^n \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{(2n + 1) \cdot x + k \cdot (x - X_c)}{2 \sqrt{D_{cl,cb} \cdot t}} \right) \right], \quad (16)$$

где Cs – поверхностная концентрация хлоридов, %; x – толщина защитного слоя бетона, мм; $\operatorname{erfc}(x)$ – обратная функция ошибок Гаусса; $D_{cl,cb}$ – коэффициент диффузии хлоридов карбонизированного бетона; $X_c = X_c(t)$ – глубина карбонизации бетона, мм; t – время; a и k коэффициенты, определяемые по уравнениям (14) и (15), $D_{cl,ucb}$ – коэффициент диффузии хлоридов некарбонизированного бетона.

Определение коэффициента диффузии. Коэффициент диффузии в уравнениях (13) и (14) равен

$$D_a(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^{ncl} k_e k_t k_c, \quad (17)$$

где D_0 – коэффициент диффузии хлоридов, определенный при стандартных условиях, m^2/c ; k_c – коэффициент влияния технологии изготовления; k_e – коэффициент влияния среды; k_t – коэффициент влияния метода испытаний; t_0 – эталонное время (время определения коэффициента диффузии), с; ncl – фактор возраста.

Поскольку исследуется комбинированное действие карбонизации и хлоридной агрессии, то коэффициенты диффузии рассчитываются

согласно

$$D_{cl,cb/ucb}(t) = D_{cl,cb/ucb}^0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^{ncl} k_e k_t k_c, \quad (18)$$

где $D_{cl,cb/ucb}^0$ – коэффициент диффузии хлоридов карбонизированного/некарбонизированного бетона в момент времени t_0 , m^2/c .

Для эксплуатируемых конструкций $D_{cl,cb/ucb}^0$ определяется экспериментально. Для проектируемых конструкций возникает проблема с определением начального коэффициента диффузии хлоридов карбонизированного бетона.

Изменение структуры пор за счет карбонизации, которое влияет на коэффициент диффузии, определяется согласно [10]:

$$D_{cl,cb}^0 = D_{ucb} \cdot f_p(\Omega, \delta), \quad (19)$$

где $f_p(\Omega, \delta)$ – влияние изменения структуры пор на коэффициент диффузии. Это влияние может характеризоваться изменением кривизны Ω и сжимаемости δ пор:

$$f_p(\Omega, \delta) = \frac{\delta}{\delta_0} \frac{\Omega_0}{\Omega}, \quad (20)$$

где δ_0 и Ω_0 – начальная сжимаемость и начальная кривизна соответственно.

Под кривизной понимают извилистость пор в бетоне. Сужение пор влияет на перенос хлорида. Кривизна и сужение оцениваются следующими уравнениями:

$$\Omega = -b_1 \tanh[b_2(\varphi - b_3)] + b_4, \quad (21)$$

$$\delta = c_1 \tanh[c_2(\log r_p - c_3)] + c_4, \quad (22)$$

где $b_1 \dots b_4, c_1 \dots c_4$ – параметры, зависящие от структуры бетона и определяющиеся экспериментально в момент времени t ; r_p – средний радиус пор.

Таблица 1
Значения коэффициентов диффузии для карбонизированного и некарбонизированного бетонов

В/Ц	$D_{cl,cb} \cdot 10^{-12}$	$D_{ucb} \cdot 10^{-12}$
0,40	8,181	1,383
0,45	11,689	2,387
0,50	15,191	4,114
0,55	30,268	6,564

Значения начальных коэффициентов диффузии карбонизированного и некарбонизированного бетонов для портландцемента представлены в таблице 1 [8].

Верификация расчетов по вероятностной модели. Для оценки влияния совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии на бетон шельфовых сооружений были приняты железобетонные конструкции ХС4 и ХС3 классов по условиям эксплуатации со средними значениями параметров бетонной смеси согласно нормам [7] и минимальными толщинами защитного слоя бетона согласно СП 28.13330.2012. Конструкции эксплуатируются в шельфовой зоне о. Сахалин. Для упрощения расчетов величина карбонизации определялась детерминированным методом по СЕВ-FIB [9]. Исходные данные представлены таблице 2.

Результаты вероятностного моделирования приведены на рисунках 1-4 и в таблицах 3 и 4.

Таблица 2
Данные для моделирования концентрации хлоридов в железобетонной конструкции для южной части о. Сахалин

Параметр	Ед. изм.	Тип распределения	Среднее значение	Среднеквадр. отклонение
C_s	%	Const	2.5	-
x	мм	Const	Вектор из множества {0 – 50}	-
$D_{cl,cb}^0$	м ² /с	Normal	$11,689 \cdot 10^{-12}$	$1.2 \cdot 10^{-12}$
$D_{cl,ucb}^0$	-	Normal	$2,387 \cdot 10^{-12}$	$1.2 \cdot 10^{-12}$
k_e	-	Normal	0,67	0,05
T_{ref}	К	Normal		
T	К	Const	273	
k_t	-	Normal	0,8	0,05
k_c	-	Normal	1	0.125
t_0	год	Const	0.0767	-
t	год	Const	Вектор из множества { t_0 – 50}	-
n_{cl}	-	Beta	0.3	$a = 0; b = 1$
C_{crit}	%	Normal	0.4	0.063

Таблица 3
Результаты моделирования совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии для юга о. Сахалин

Параметр для $t = 50$ лет	Ед. изм.	Величина
Фронт карбонизации	мм	32,13
Концентрация хлоридов на глубине залегания арматуры без учета карбонизации (DuraCrete)	%	0,442
То же с учетом карбонизации	%	0,638
Время инициации хлоридной коррозии без учета карбонизации – по модели DuraCrete	годы	46
То же с учетом карбонизации	годы	29

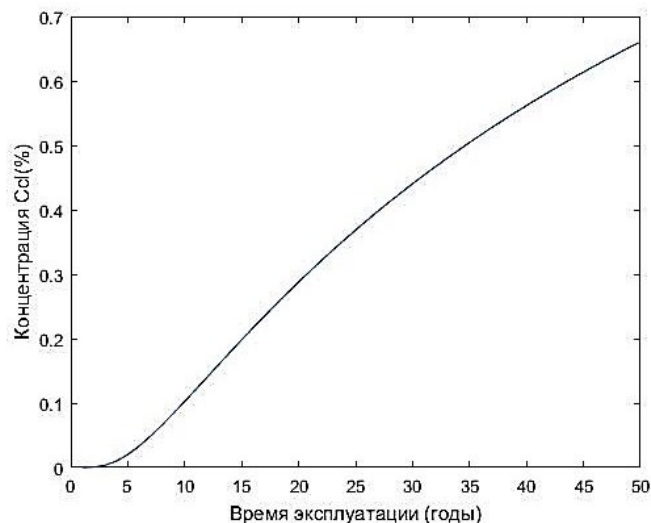


Рис. 1. Изменение концентрации хлоридов в приарматурной зоне для всего срока эксплуатации

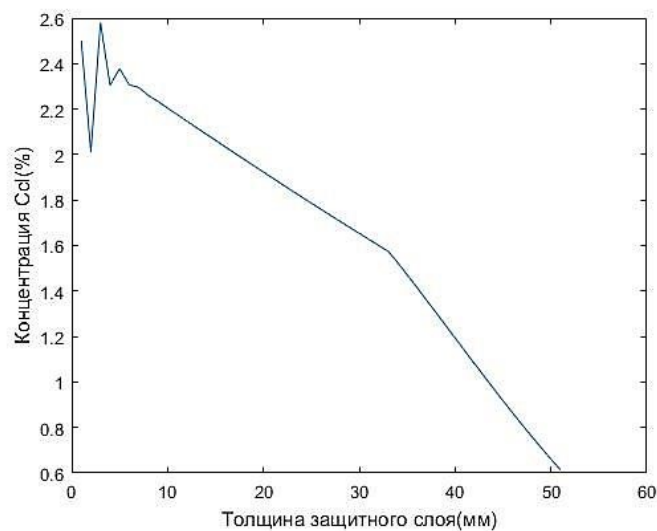


Рис. 2. Хлоридный профиль в приарматурной зоне после срока эксплуатации 50 лет

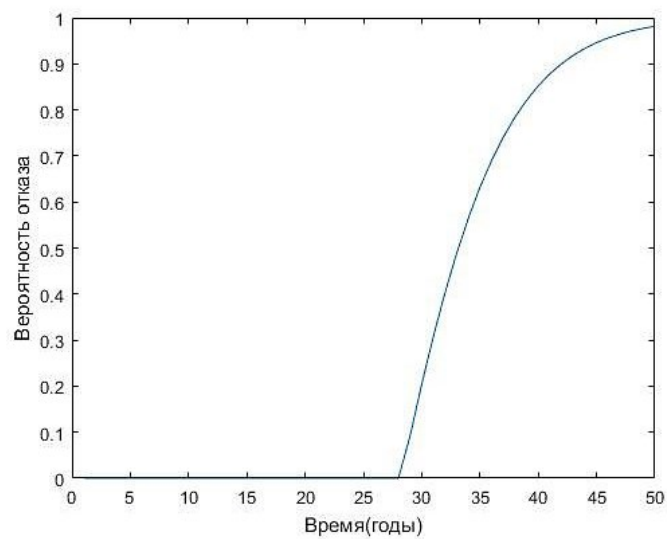


Рис. 3. Вероятность отказа конструкции

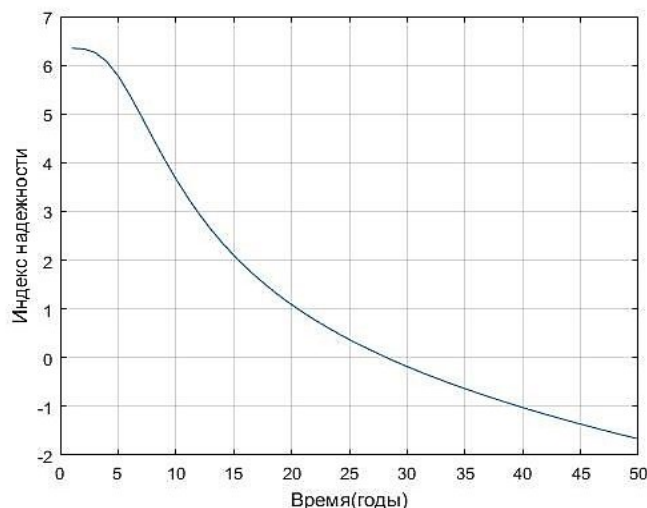


Рис. 4. Индекс надежности конструкции

Таблица 4
Расчетные параметры для наиболее неблагоприятного района о. Сахалин по условиям эксплуатации

Срок эксплуатации	Вероятность отказа p_f	Индекс надежности β
10	0,0001	3,688
20	0,0050	1,102
30	0,1900	-0,173
40	0,8490	-1,020
50	0,9810	-1,660

Согласно расчетам, после 50 лет эксплуатации в южном районе о. Сахалин по условиям эксплуатации вероятность отказа составила $p_f = 98 \%$. Железобетонная конструкция на портландцементе без добавок с В/Ц = 0,4 при эксплуатации на юге о. Сахалин уже после 29 лет эксплуатации не соответствует требованиям по долговечности. Полученное значение индекса надежности для 50 лет эксплуатации $\beta = -1,66$ меньше требуемого значения $\beta = 1,5$, согласно [9] (при проверке по предельному состоянию эксплуатационной пригодности для железобетонных конструкций в нормальных условиях по эксплуатации).

Выводы. Усовершенствована теоретическая модель, разработана методика прогнозирования долговечности морских сооружений при воздействии хлоридов. Она позволяет учитывать комплекс внешних факторов, включая толщину защитного слоя бетона, коэффициент диффузии хлоридов, критическое и поверхностное содержание хлоридов, время воздействия, атмосферные условия, часть из которых являются стохастическими, в стационарном случае – случайными величинами с заданными законами распределения. Для оценки конструкции по предельному состоянию рассчитываются периоды инициирования и распространения коррозии арматуры при воздействии морской среды и сравниваются со сроком эксплуатации.

Предложены оценка срока службы в Matlab методом Монте-Карло по величине проникновения хлоридов к арматуре либо решение обратной задачи определения ресурса конструкций с заданной вероятностью. Возможен учет эффекта ремонта конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонович С. Н. Алгоритм расчета долговечности железобетонных конструкций при хлоридной агрессии // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: сб. тр. VII междунар. науч.-метод. семинара; под ред. Н. П. Блещика, А. А. Борисевича, Т. М. Пецольда. Брест: БрГТУ, 2001. С. 432-435.
2. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: монография: в 2 т. / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский, О. Ю. Чернякевич и др. Минск: БНТУ, 2016. 204 с.
3. Федосов С. В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ПресСто, 2010. 364 с.

4. Влияние кольматации пор цементного камня на жидкостную коррозию гидрофобизированных бетонов / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, В. С. Коновалова и др. // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2018. № 6(32). С. 44-48.
5. Федосов С. В., Румянцева В. Е., Красильников И. В. Математическое моделирование кинетики и динамики массообменных процессов в железобетонных конструкциях, эксплуатируемых в жидких агрессивных средах // Инновации в строительстве: сб. трудов междунар. науч.-практ. конференции. 2017. С. 143-150.
6. Федосов С. В., Румянцева В. Е., Коновалова В. С. Прогнозирование долговечности железобетонных изделий // Современные задачи инженерных наук: сб. науч. трудов междунар. науч.-техн. симпозиума. 2017. С. 109-111.
7. EN 206:2013. European Standard. Concrete – Specification, performance, production and conformity. Brussels: European Committee for Standardization, 2013. 93 p.
8. Lee C.S., Yoon I.S. Prediction of deterioration process for concrete considering combined deterioration of carbonation and chloride // J Korea Concrete Institute. 2003. Vol. 15, 6. P. 902–912.
9. Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures // FIB (CEBFIP) Bulletin, 2006. P. 153-161.
10. Zhu X., Goangseup Z. Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete // Construction and Building Mater. 2016.

Информация об авторах

ШАЛЫЙ Евгений Евгеньевич – научный сотрудник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток. E-mail: john_shamali@mail.ru.

ЛЕОНОВИЧ Сергей Николаевич – иностранный академик РААСН, доктор технических наук, декан строительного факультета Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь. E-mail: snleonovich@yandex.ru.

КИМ Лев Владимирович – советник РААСН, кандидат технических наук, доцент кафедры гидротехники, теории зданий и сооружений Инженерной школы Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток. E-mail: kim_lvl@dvfu.ru.

UDK 691.328.1

DURABILITY OF MARINE STRUCTURES AT COMBINED CORROSION OF CONCRETE

E. E. Shaly¹, S. N. Leonovich², L. V. Kim¹

¹Far Eastern Federal University (Vladivostok),

²Belorussian National Technical University (Minsk)

Abstract. The State program for the development of the Northern Sea Route and appropriate port infrastructure in the Arctic zone of the Russian Federation made the task of increasing the durability of reinforced concrete structures widely used in the construction of northern ports urgent. Survey data show that the average service life of marine concrete structures is 30 years. About 90 % of them have concrete defects in the form of cracks and spalling and corrosion of the reinforcement, which reduce the durability and bearing capacity. In sea conditions, the main defects of the protective layer of concrete are observed in the initial period of 7-10 years. In the diagnosis of 85 % of the repaired structures within 100 m of the shoreline again in 5-10 years, signs of repeated degradation are recorded, which indicates the ineffectiveness of the repair method. Chloride aggression is one of the main reasons for corrosion of reinforcement of concrete structures, mainly offshore and coastal structures. Chloride ions have the greatest activating ability from all kinds of anions. Penetration of chloride ions due to capillary suction and diffusion destroys the passivation protective film on the reinforcement, resulting in rapid destruction of the protective layer of concrete.

In this study the model of diffusion of chloride ions has been improved and software has been developed for the analysis of longevity. Modeling of chlorine ion concentration on the depth of the protective layer of concrete reinforced concrete structure in accordance with the conditions of its operation is performed. It is required to develop optimal resource-saving repair schemes to reduce the overall cost of structures. A probabilistic technique for predicting the longevity of marine structures with combined corrosion from carbonization and chloride aggression is proposed. One of the conditions for the reliability of offshore structures is the correspondence of

the properties of the material to the natural and climatic conditions of the construction area. The task of experimental studies was to obtain quality characteristics that determine the service life of concrete structures. The model was verified to solve the problem of determining the chlorine concentration in the protective layer of concrete in hydraulic structures. Natural and laboratory studies of the port infrastructure of the southern part of Sakhalin Island in the cities of Kholmsk and Korsakov were carried out. The chloride content near the reinforcement was compared with the limiting content, that is, the chloride content, at which the corrosion of the reinforcement begins. Calculations were carried out for the models of the combined effect of carbonization and chloride ingress, which showed satisfactory convergence.

Keywords: corrosion, carbonation, chloride ingress, probability, failure, reliability index.

REFERENCES

1. Leonovich S. N. Algoritm rascheta dolgovechnosti zhelezobetonykh konstruksiy pri khloridnoy agressii [Algorithm for Calculating the Durability of Reinforced Concrete Structures in Chloride Aggression], *Sbornik trudov VII Mezhdunarodnogo nauchno-metodicheskogo seminara* [Proceedings VII International Scientific and Methodological Seminar], 2001, pp. 432-435.
2. Leonovich S. N., Litvinovsky D. A., Chernyakevich O. Yu., Stepanova A. V. Prochnost', treshchinostojkost' i dolgovechnost' konstrukcionnogo betona pri temperaturnyh i korrozionnyh vozdeystviyah: monografiya: v 2 t. [Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and corrosive effects: monography: in 2 vol.], Minsk: BNTU, 2016, 204 p.
3. Fedosov S. V. Teplomassoperenos v tekhnologicheskikh processah stroitel'noj industrii [Heat and mass transfer in the technological processes of the construction industry], Ivanovo: Pressto, 2010, 364 p.
4. Fedosov S. V., Rummyantseva V. E., Konovalova V. S. et al. Vliyanie kol'matacii por cementnogo kamnya na zhidkostnuyu korroziyu gidrofobizirovannykh betonov [The influence of pore cement coating on the liquid corrosion of water-repellent concrete], *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve* [Technical regulation in transport construction], 2018, 6(32), pp. 44-48.
5. Fedosov S. V., Rummyantsev V. E., Krasilnikov I. V. Matematicheskoe modelirovanie kinetiki i dinamiki massoobmennyykh processov v zhelezobetonykh konstrukciyah, ehkspluatiruemykh v zhidkikh agressivnykh sredah [Mathematical modeling of the kinetics and dynamics of mass-exchange processes in reinforced concrete structures operated in liquid aggressive environments], *Innovacii v stroitel'stve: sb. trudov mezhdunar. nauch.-prakt. konferencii* [Innovations in construction: proc. International scientific and practical conference], 2017, pp. 143-150.
6. Fedosov S. V., Rummyantsev V. E., Konovalova V. S. Prognozirovanie dolgovechnosti zhelezobetonykh izdelij [Forecasting the durability of reinforced concrete products], *Sovremennye zadachi inzhenernykh nauk: sb. nauch. trudov mezhdunar. nauch.-tekhn. simpoziuma* [Modern problems of engineering sciences: proc. International Scientific and Technical Symposium], 2017, pp. 109-111.
7. EN 206:2013. European Standard. Concrete – Specification, performance, production and conformity, Brussels: European Committee for Standardization, 2013, 93 p.
8. Lee C. S., Yoon I. S. Prediction of deterioration process for concrete considering combined deterioration of carbonation and chloride ion, *J Korea Concrete Institute*, 2003, Vol. 15, 6, pp. 902-912.
9. Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures, *FIB (CEBFIP) Bulletin*, 2006, pp. 153-161.
10. Zhu X., Goangseup Z. Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete, *Construction and Building Materials*, 2016.

Information about the authors

SHALY Evgeny Evgenyevich – Lead Researcher of School of Engineering, Far Eastern Federal University, Vladivostok. E-mail john_shamali@mail.ru.

LEONOVICH Sergei Nikolaevich – Foreign Academician RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of Civil Engineering Faculty, Belorussian National Technical University, Minsk. E-mail: snleonovich@yandex.ru.

KIM Lev Vladimirovich – Advisor RAACS, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Offshore and Structural Engineering, School of Engineering, Far Eastern Federal University, Vladivostok. E-mail kim_lv1@dvfu.ru.

Библиографическая ссылка

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.