

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.12737/article_5b115a5ef027c2.76676320

¹Шалый Е.Е., аспирант,¹Ким Л.В., канд. техн. наук, доц.,²Леонович С.Н., д-р техн. наук, проф.¹Дальневосточный федеральный университет²Белорусский национальный технический университет

ЖЕЛЕЗОБЕТОН ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КАРБОНИЗАЦИИ И ХЛОРИДНОЙ АГРЕССИИ: ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЁТА-ПРОГНОЗА СРОКА СЛУЖБЫ

kimlv2@yandex.ru

С развитием Северного Морского Пути и наращиванием нефтедобычи на шельфе сегодня проблема определения долговечности инженерных гидротехнических и портовых сооружений является крайне актуальной. Согласно официальной статистики больше половины портовых сооружений находятся в неудовлетворительном состоянии и требуют ремонта или реконструкции, в свою очередь это требует значительных капиталовложений. Опыт эксплуатации показал, что средний срок службы большинства гидротехнических сооружений составляет 30–40 лет, тогда как нормативный срок службы должен составлять минимум 50–100 лет. Сегодня около 90 % железобетонных портовых сооружений имеют дефекты бетона и арматуры, которые снижают долговечность и несущую способность. В процессе эксплуатации эти сооружения, как правило, подвергаются комплексу тяжелых агрессивных воздействий, поэтому на стадии проектирования важно предусмотреть целый ряд факторов, которые могут повлиять на фактический срок службы их железобетонных элементов. Существующие методики проектирования не в полном объеме отражают реальные условия эксплуатации гидротехнических сооружений. Это особенно ярко проявляется в районах, где одновременное воздействие таких факторов, как низкие температуры воздуха и большое число ясных дней в зимнее время при сильной солнечной радиации, приводит к резкому изменению реальных условий эксплуатации по сравнению с расчетными. Бетоны многих сооружений и конструкций испытывают большее число агрессивных воздействий, чем это предусматривается нормами проектирования. Поэтому, из выше сказанного следует, что проблема прогноза ресурса железобетонных элементов, как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации, всегда была наименее изученной в теории сооружений и наиболее весомой в социально-экономическом плане. Разработана методика прогнозирования долговечности железобетонных конструкций при совместном воздействии карбонизации и хлоридной агрессии с использованием конечно-разностной и вероятностной моделей. Учен период иницирования коррозии арматуры и период распространения для условий шельфовой зоны о. Сахалин. Выполнены полевые исследования сооружений портов Холмск и Корсаков. Произведена оценка фронта карбонизации и содержания хлоридов по глубине защитного слоя бетона. Предложена модель, позволяющая определить средний период до ремонта с учетом скорости деградации защитного слоя бетона от одновременного воздействия двух коррозионных процессов: карбонизации и хлоридной агрессии.

Ключевые слова: армированный бетон, карбонизация, хлоридная агрессия, прогнозирование срока службы, вероятностная модель.

1. Состояние вопроса и задачи исследований.

Цель исследования: разработать методику расчета долговечности железобетонных конструкций для климатических условий прибрежной зоны морей Дальнего Востока от комплексного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии.

Задачи исследования:

1. Проанализировать результаты исследований комплексного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии на морской бетон;

2. Усовершенствовать теоретические модели карбонизации и хлоридной агрессии с учетом зарождения и развития трещины в защитном слое бетона;

3. Разработать вероятностный метод прогнозирования срока службы железобетонных портовых конструкций с учетом комплексного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии;

4. Экспериментально исследовать техническое состояние железобетонных элементов эксплуатируемых портовых сооружений, и вы-

явить особенности их деградации в морской среде, в том числе, с учетом технологических факторов;

2. Верификация детерминистической модели расчета совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии на морской бетон на основе 2-го закона Фика.

Принята модель решения дифференциального уравнения диффузии, выведенная J. Crank, с учетом влияния карбонизации на перенос хлор-ионов в бетоне. Основное уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{D_{Cl}^*}{1 + \left(\frac{1}{w_e}\right) \cdot \left(\frac{\alpha_L(1-d \cdot a_c)}{C_f}\right)^2} \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2} \quad (1)$$

где α_L и β_L – эмпирические константы; a_c – степень карбонизации бетона; d – коэффициент понижения связывающей способности хлорида за счет карбонизации; C_{cl} – общее содержание хлорида в бетоне; C_f – содержание свободного хлорида в бетоне; t – время эксплуатации; b – масса вяжущего; x – глубина защитного слоя.

Степень карбонизации бетона определяется из пропорции

$$\begin{aligned} \%X_c &= 100\% a_c \\ \%K_c &= x\% a_c \end{aligned}$$

где X_c – предельная величина карбонизации, K_c – карбонатная составляющая

$$K_c = \frac{m_{CaCO_3}}{m_n} 100\% \quad (2)$$

Здесь m_{CaCO_3} – масса карбонатной составляющей; m_n – масса навески пробы, определяется экспериментально.

Предельная величина карбонизации X_c определяется по формуле

$$X_c(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{CO_2}}{a_c} \cdot \int_1^t f_T(t) \cdot f_W(t) \cdot C_{CO_2}(t) dt} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{0.12} \quad (3)$$

где $f_T(t)$, $f_W(t)$, $C_{CO_2}(t)$ – функции влияния температуры, влажности и концентрации CO_2 на коэффициент диффузии; a_c – коэффициент, определяющий количество CO_2 , необходимое для превращения всех способных карбонизироваться продуктов гидратации; D_{CO_2} – начальный коэффициент диффузии углекислого газа в бетоне.

Для учета влияния CO_2 выполнена оценка содержания углекислого газа в воздухе с учетом срока службы железобетонных конструкций,

$$C_1(x, t) = C_0 \sum_{n=0}^{\infty} a^n \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{2 \cdot n \cdot e + x}{2 \sqrt{D_1(t) \cdot t}} \right) - a \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+2) \cdot e - x}{2 \sqrt{D_1(t) \cdot t}} \right) \right] \quad (6)$$

$$C_2(x, t) = \frac{2 \cdot k \cdot C_0}{k+1} \sum_{n=0}^{\infty} a^n \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{(2n+1) \cdot e + k \cdot x}{2 \sqrt{D_1 \cdot t}} \right) \right] \quad (7)$$

$$a = \frac{1-k}{1+k} \quad (8)$$

согласно данным кривой Килинга. Поскольку концентрация хлоридов в морской среде изменяется в зависимости от погодных условий, модель воздействия морской воды на сооружения модифицирована вводом зависимости от расстояния между сооружением и берегом [1–4].

Для верификации модели совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии взяты железобетонные конструкции классов ХС4 и ХС3 по условиям эксплуатации со средними значениями параметров бетонной смеси согласно EN 206:2013 и минимальными толщинами защитного слоя бетона по СП 28.13330.2012. Согласно предложенной методике, проведены расчеты для данных табл. 1.

Для моделирования использована и модифицирована программа в Mathcad (авторы Д. Шестовицкий и Э. Карапетов), выполненная на основе конечно-разностного подхода (рис. 1, табл. 2).

Результаты показали, что карбонизация привела к высвобождению хлоридных ионов в поровый раствор, в следствии чего, уменьшается срок службы конструкции.

3. Методика вероятностного расчёта совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии. представлена методика вероятностного расчета совместного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии на бетон. В основе лежит уравнение вероятности отказа:

$$P_f = P(R - S \leq 0) \leq P \quad (4)$$

где P_f – вероятность отказа; P – допустимая вероятность наступления предельного состояния; S – функция нагружения; R – функция сопротивления конструкции.

Для хлоридной коррозии, в вероятностной постановке, S представляет собой значение концентрации хлоридов $C(x, t)$. C_{crit} – параметр критической (пороговой) концентрации хлорида на уровне залегания арматуры, превышение которого приводит к иницированию коррозии. В этом случае вероятность безотказной работы:

$$P_f = P(\{C_{crit} - C(x, t)\} \leq 0) \leq P \quad (5)$$

$C(x, t)$ определяется с использованием модели, которая базируется на решении 2-го закона диффузии А. Фика с помощью функции ошибки Гаусса (C. Andrade)

$$k = \sqrt{D_1/D_2} \tag{9}$$

Модель базируется на различии коэффициентов диффузии в одном срезе («скин-эффект»), что происходит либо в результате ремонтного восстановления защитного слоя бетона, либо

при действии множества агрессивных факторов внешней среды на конструкцию. В случаях совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии, ур. (6) и (7) преобразуются к виду:

$$Ccl_{cb}(x, t) = Cs \sum_{n=0}^{\infty} a^n \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{2 \cdot n \cdot X_c + x}{2 \sqrt{D_{cl,cb}(t) \cdot t}} \right) - a \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+2) \cdot X_c - x}{2 \sqrt{D_{cl,cb}(t) \cdot t}} \right) \right] \tag{10}$$

$$Ccl_{ucb}(x, t) = \frac{2 \cdot k \cdot Cs}{k+1} \sum_{n=0}^{\infty} a^n \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{(2n+1) \cdot x + k \cdot (x - X_c)}{2 \sqrt{D_{cl,cb} \cdot t}} \right) \right] \tag{11}$$

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 кар-

бонизации бетона, мм; t – время, годы; a и k – коэффициенты из ур. (8) и (9); $D_{cl,ucb}$ – коэффициент диффузии хлоридов некарбонизированного бетона.

Таблица 1

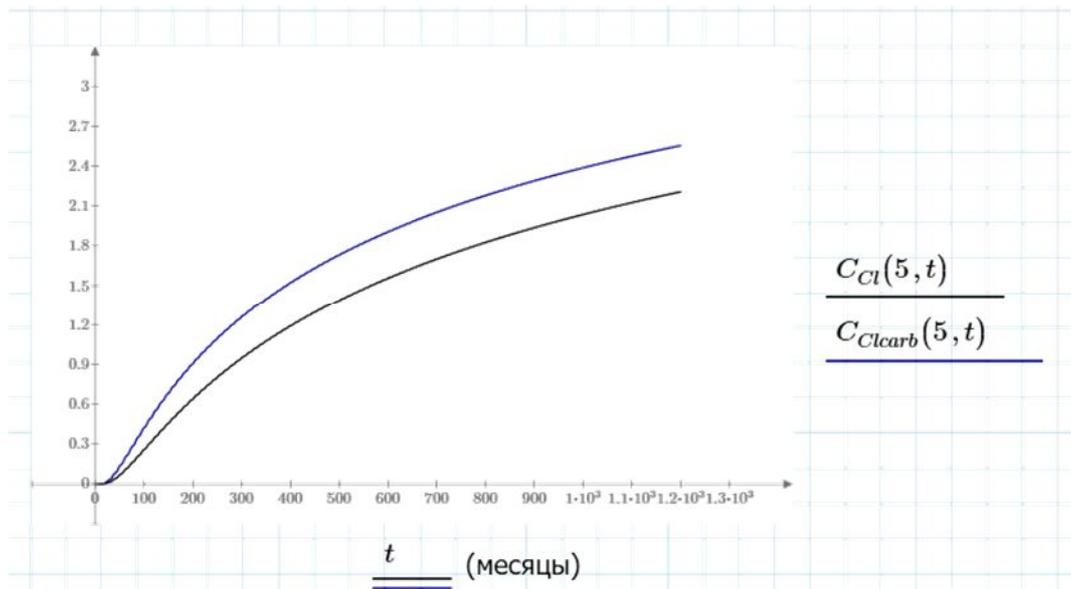
Исходные данные конечно-разностной модели

Параметр	Ед. изм.	Участок о. Сахалин		
		Северный	Центральный	Южный
T_{max}	°С	18,3	20,5	17,7
T_{min}	°С	-7,3	-6,2	-2,4
W_{max}	%	86	81	85
W_{min}	%	74	76	71
w/b		0,4	0,4	0,4
b	кг/м ³	350	350	350
Карбонизация				
g_e	-	2,5	2,5	2,5
f_e	-	5	5	5
E	кДж/моль	40	40	40
R	кДж/К	$8,314 \cdot 10^{-3}$	$8,314 \cdot 10^{-3}$	$8,314 \cdot 10^{-3}$
C_s	кг/м ³	$3,890 \cdot 10^{-4}$	$3,890 \cdot 10^{-4}$	$3,890 \cdot 10^{-4}$
D_{CO_2}	см ² /с	$3,399 \cdot 10^{-4}$	$3,399 \cdot 10^{-4}$	$3,399 \cdot 10^{-4}$
n_m	-	0.12	0.12	0.12
Хлоридная агрессия				
E	кДж/моль	41,8	41,8	41,8
R	кДж/К	$8,314 \cdot 10^{-3}$	$8,314 \cdot 10^{-3}$	$8,314 \cdot 10^{-3}$
α_L	-	0,1185	0,1185	0,1185
β_L	-	0,09	0,09	0,09
W_{ref}	%	65	65	65
$C_{env}(L)$	кг/м ³	6,2	6,2	6,2
m	-	0,4	0,4	0,4
t_0	дней (лет)	28 (0,0767)	28(0,0767)	28(0,0767)
t	лет	50	50	50

Таблица 2

Результаты моделирования

Параметр	Ед. изм.	Место эксплуатации		
		Северный	Центральный	Южный
Фронт карбонизации (t=50 лет)	мм	30,8	29,6	29,4
Степень карбонизации	-	0,61	0,6	0,6
Концентрация хлоридов на глубине залегания арматуры без учета карбонизации (при t=50 лет)	%	0,55	0,65	0,44
Тоже с учетом карбонизации (при t=50 лет)	%	0,65	0,6	0,54
Время инициации хлоридной коррозии без учета карбонизации	годы	50	40	43
Тоже с учетом карбонизации	годы	45	35	30



$C_{Cl}(x,t)$ – концентрация ионов хлорида на глубине защитного слоя X см без учета карбонизация в зависимости от времени t , кг-м³. $C_{Cl}(x,t)$ - концентрация ионов хлорида на глубине защитного слоя X см с учетом карбонизации, в зависимости от времени t , кг-м³. Критическая концентрация хлорида принята 0,4 % или 1,4 кг/м³ по массе вяжущего

Рис. 1. График изменения концентрации хлоридов в защитном слое бетона с учетом и без учета карбонизации (южный участок)

В исследовании также учитывается сопротивление между слоями, которое возникает в результате разницы коэффициентов диффузии в одном срезе:

$$C_{cl_{ucb}}(x,t) = \frac{2 \cdot k \cdot C_s \cdot R}{k+1} \sum_{n=0}^{\infty} a^n \operatorname{erfc} \left[\frac{(2n+1) \cdot x + k \cdot (x - X_c)}{2 \sqrt{D_{cl,cb} \cdot t}} \right] \quad (12)$$

где R – сопротивление между слоями; $C(x,t)$ с учетом действия карбонизации рассчитывается, как система из ур. (10) и (12).

В расчетную модель комбинированного действия карбонизации и хлоридной агрессии входит ряд базисных переменных. Предложены рекомендации по средним значениям этих переменных и их типам распределения. Для южной части о. Сахалин в табл. 3 даны их средние значения, стандартное отклонение и тип распределения.

Таблица 3

Данные для вероятностного моделирования концентрации хлоридов

		Южная часть о. Сахалин		
Параметр	Ед. изм.	Тип распределения	Среднее значение	Стандартное 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
	К	Normal	-	–
	К	Const	273	–
k_t	–	Normal	0,80	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

Для аналитического решения прямой задачи определения вероятности ресурсного отказа и обратной задачи определения процентного ресурса конструкций использовано имитационное моделирование с вычислением необходимых функционалов, например, содержания хлоридов на заданной глубине, срока службы и т.п.

Для компьютерной реализации в программе Matlab написан код для расчета по модели проникновения хлоридов с учетом эффекта карбонизации. Результат расчета программы - вероятности ресурсного отказа конструкции и индексы надежности в течение срока службы для различных значений толщин защитного слоя бетона. На первом этапе программа определяет глубины карбонизации и изменение концентрации хлоридов по глубине (рис. 2–4).

Далее, после построения графиков рис. 2–4 программа вычисляет вероятность отказа железобетонной конструкции и ее индекс надежности (рис. 5 и 6, табл. 4). Для 50 лет эксплуатации на южном участке о. Сахалин вероятность отказа получена $p_f = 98 \%$.

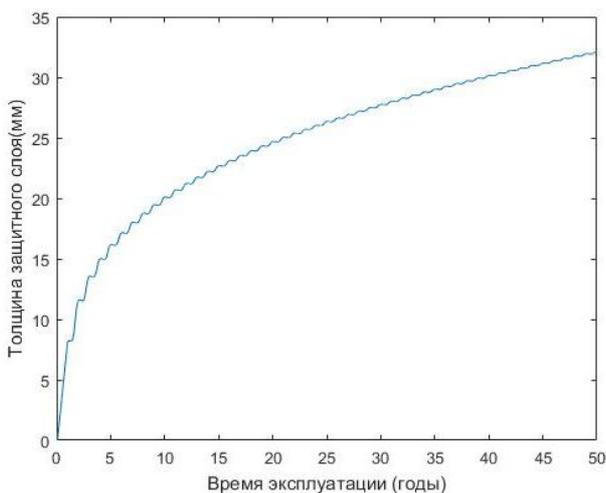


Рис. 2. Рост глубины карбонизации с течением времени

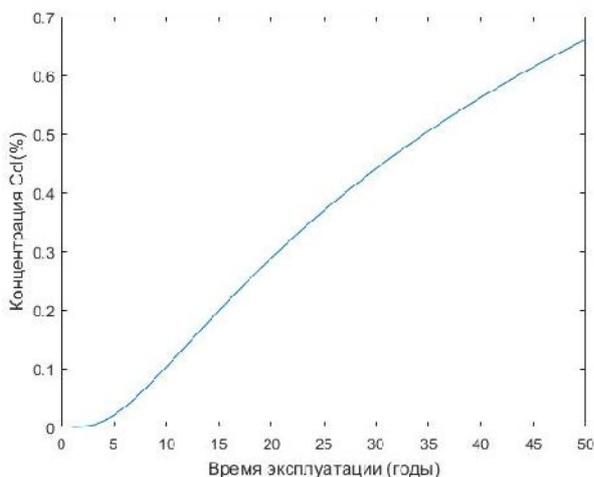


Рис. 3. Изменение концентрации хлоридов в приарматурной зоне для всего срока эксплуатации

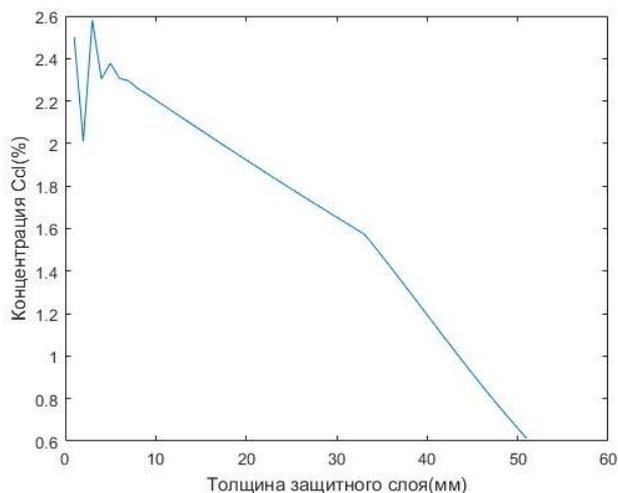


Рис. 4. Профиль концентрации хлоридов в приарматурной зоне в последний год эксплуатации (50 лет)

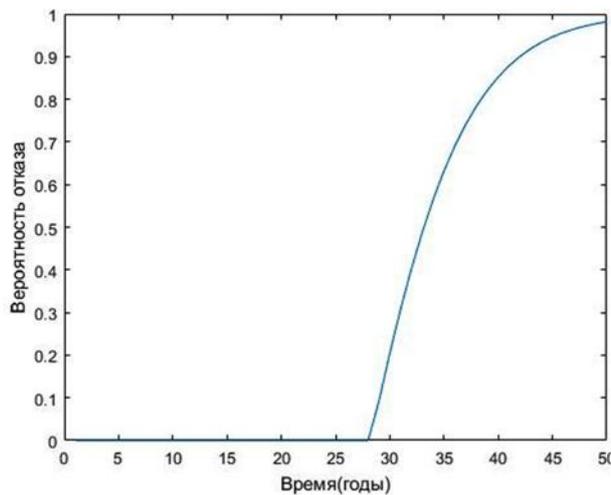


Рис. 5. Вероятность отказа конструкции

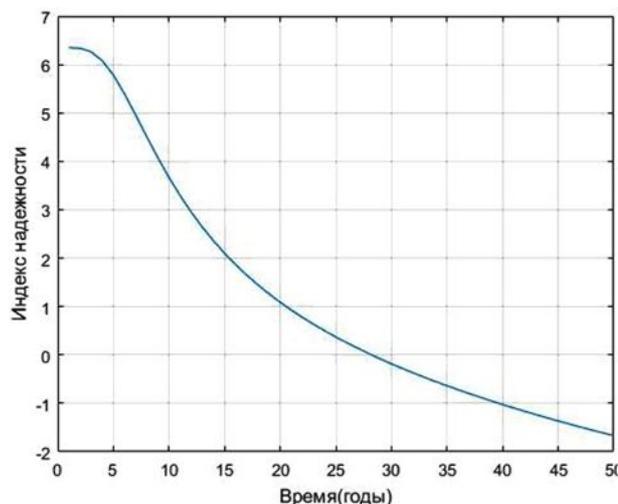


Рис. 6. Индекс надежности конструкции

Таблица 4

Вероятность отказа и индекс надежности железобетонных конструкций в зависимости от срока эксплуатации для южного участка о. Сахалин

Срок эксплуатации	Вероятность отказа, p_f	Индекс надежности, β
10	0,0001	3,688
20	0,005	1,102
30	0,19	-0,173
40	0,849	-1,02
50	0,981	-1,66

4. Результаты натуральных исследований

Работы включали: визуальный осмотр, определение критических элементов и областей, определение прочности и толщины защитного слоя бетона, выбор тестовых зон по результатам измерений.

В тестовых зонах проведены: визуальный осмотр для выбора мест тестирования и отбора проб, проверка глубины защитного слоя бетона, выбор мест отбора проб в «наихудших местах» конструкций, определение глубины карбонизации способом фенолфталеиновой пробы в 6 и более местах (на свежееобломанных и просверленных участках); отбор пластин для хлоридных профилей: (минимум шесть пластин в каждой тестовой зоне минимального размера 70×70 мм и минимальной глубины 50 мм).

В лаборатории определены: с помощью ионоселективного электрода значение концентрации хлоридов по глубине образцов, способом фенолфталеиновой пробы – глубина карбонизации.

Результаты моделирования совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии и их сравнение с экспериментальными данными (табл. 5).

Таблица 5

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов

Тип	Место отбора пробы	Возраст конструкции	Глубина защитного слоя, мм	Измеренная концентрация Cl, %	Расчетная концентрация Cl, %	Концентрация Cl, % по вероятностной модели
Холмский морской торговый порт						
X4	Железобетонная колонна пешеходного моста	33	10	2,24	2,80	2,20
			20	1,97	2,20	1,90
			30	1,64	1,81	1,62
			40	1,10	1,20	1,03
			50	0,51	0,58	0,49
X5	Железобетонная балка пешеходного моста	33	10	2,25	2,28	2,21
			20	1,98	2,21	1,94
			30	1,68	1,82	1,62
			40	1,10	1,20	1,03
			50	0,50	0,58	0,49
Корсаковский морской торговый порт						
K4	Фундамент под знак СНО	44	10	2,32	2,76	2,13
			20	1,81	2,19	1,77
			30	1,46	1,77	1,44
			40	1,10	1,17	1,07
			50	0,55	0,63	0,53
K5	Железобетонная опорная под трубы.	46	10	2,32	2,79	2,15
			20	1,81	1,22	1,80
			30	1,48	1,81	1,50
			40	1,10	1,23	1,10
			50	0,55	0,65	0,55

Получена хорошая сходимость с вероятностной моделью и удовлетворительная с конечно-разностной (последняя не учитывает «скин-эффект»). Коэффициент диффузии в конечно-разностной модели постоянен на всей глубине защитного слоя, т.е. нет разбивки на 2

слоя с разной диффузией и нет сопротивления между этими слоями, поэтому концентрации хлоридов в приарматурной зоне завышена. Однако, эта модель может быть применима для расчета совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии при малой глубине карбо-

низации, когда «скин-эффект» не оказывает значительного влияния на концентрацию хлоридов в приарматурной зоне.

Таким образом, при незначительной глубине карбонизации (до 8 мм) расчет можно вести по конечно-разностной модели, при значительной – значения завышены и расчет следует вести по вероятностной модели. На практике при глубине карбонизации до 8 мм эффект совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии не учитывается, и используется модель DuraCrete. Таким образом, наиболее точная модель – вероятностная.

5. Вероятностная модель для определения параметров для ремонта защитного слоя бетона. В этом случае предполагается, что необратимые последствия, приводящие к хлоридной коррозии арматуры в карбонизированном бетоне, могут начинаться уже при концентрации ионов хлорида 0,2 %. Используя это значение

как критическое, при котором необходимо проводить ремонт защитного слоя бетона, а также используя модель для двойной среды ур. (10) и (12), разработана программа расчета среднего времени и глубины ремонта поврежденного защитного слоя, которая также позволяет прогнозировать срок службы конструкции, но уже с учетом ремонта (табл. 4 и рис. 7). В качестве материала для ремонта выбран раствор, аналогичный исходному составу бетона.

После 50 лет эксплуатации в наиболее неблагоприятном районе о. Сахалин по условиям эксплуатации, вероятность отказа составила $pf = 58\%$. Таким образом, ремонт конструкции способом замены карбонизированного слоя новым с аналогичными характеристиками увеличивает долговечность. Например, в конструкции, в которой инициировалась коррозия после 29 лет эксплуатации, новое время инициации составляет 45 лет.

Таблица 4

Срок службы железобетонной конструкции с учетом ремонта защитного слоя бетона

Параметр	Ед. изм.	Место эксплуатации
		Южная часть о. Сахалин
Время инициации хлоридной коррозии без учета замены карбонизированного слоя	год	29
Срок службы конструкции без учета замены карбонизированного слоя	год	33
Среднее время замены карбонизированного слоя	год	16
Средняя глубина замены карбонизированного слоя	мм	24,5
Время инициации хлоридной коррозии с учетом замены карбонизированного слоя	год	45
Срок службы конструкции с учетом замены карбонизированного слоя	год	49

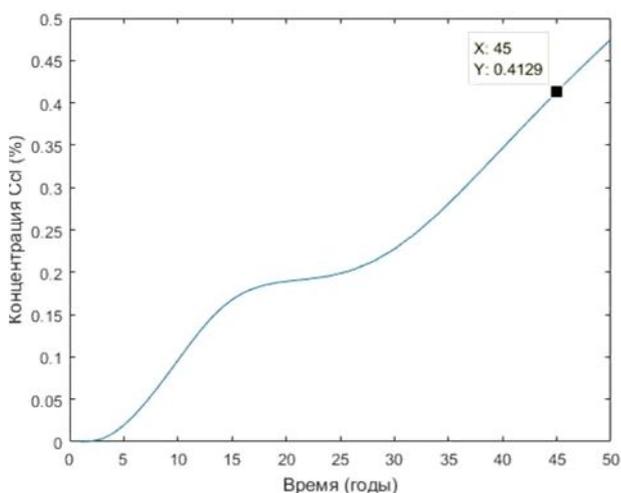


Рис. 7. Изменение концентрации хлоридов в приарматурной зоне для всего срока эксплуатации с учетом ремонта

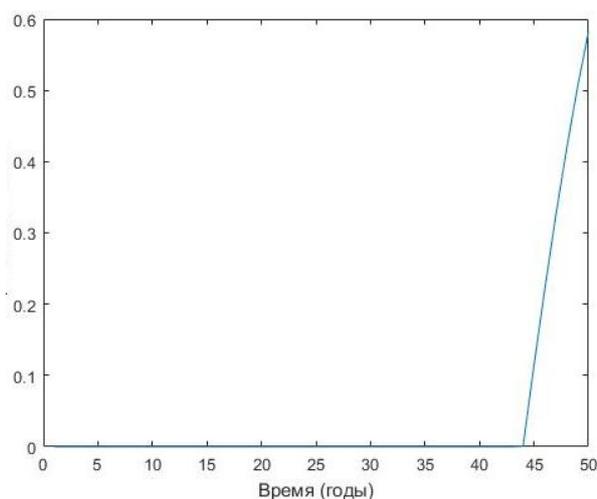


Рис. 8. Вероятность отказа отремонтированной конструкции

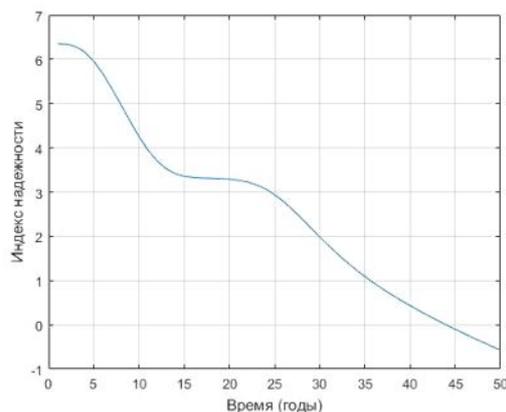


Рис. 9. Индекс надежности отремонтированной конструкции

Таблица 5

Вероятность отказа и индекс надежности отремонтированной железобетонной конструкции в зависимости от срока эксплуатации для наиболее неблагоприятного района о. Сахалин по условиям эксплуатации

Срок эксплуатации	Вероятность отказа, p_f	Индекс надежности, β
10	0,0001	4,27
20	0,0008	3,29
30	0,012	2,00
40	0,109	0,44
50	0,582	-0,57

Заключение.

1. На основе анализа моделей совместного действия карбонизации и хлоридной агрессии защитного слоя бетона и верификации с экспериментальными данными определена модель для оценки долговечности морских железобетонных конструкций, учитывающая следующие факторы: толщину защитного слоя бетона; коэффициенты диффузии хлоридов в карбонизированном и некарбонизированном бетоне; критическое содержание и поверхностное содержание хлоридов, поверхностное содержание CO_2 , их время воздействия; морские условия; фронт карбонизации и др. Часть значений являются случайными величинами с заданными законами распределения.

2. Разработана методика определения срока ремонта конструкции и глубины ремонта защитного слоя бетона сооружений.

3. Разработана методика прогнозирования долговечности железобетонных конструкций при воздействии агрессивной морской среды с учетом ремонта конструкции и с использованием вероятностной модели расчета.

4. Выполнена верификация результатов расчетов вероятности отказа железобетонных элементов по предложенной вероятностной модели.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные модели позволяют рассчитывать глубину карбонизации, концентрацию ионов хлорида на заданной глубине,

срок эксплуатации конструкции, время ее возможного ремонта и глубину возможного восстановления защитного слоя бетона для прибрежной и шельфовой зоны Дальнего Востока.

Разработанную методику прогнозирования долговечности железобетонных конструкций при совместном воздействии карбонизации и агрессивной хлоридсодержащей среды с использованием конечно-разностной модели расчета предлагается использовать при глубине карбонизации до 8 мм.

Разработанную методику прогнозирования долговечности железобетонных конструкций при совместном воздействии карбонизации и агрессивной хлоридсодержащей среды с использованием вероятностной модели расчета можно использовать:

- при оценке эксплуатационной пригодности (безопасности) при обследовании железобетонных конструкций прибрежных и шельфовых сооружений;

- при прогнозировании срока службы вновь проектируемых железобетонных конструкций;

- при расчете необходимой толщины защитного слоя бетона проектируемых железобетонных конструкций при заданном сроке службы и условиях эксплуатации;

- при расчете срока службы бетона в конкретных условиях эксплуатации.

- при прогнозировании срока ремонта эксплуатируемых сооружений;

Полученные результаты могут использоваться в проектировании новых сооружений и/или ремонте (реконструкции) существующих сооружений, эксплуатируемых в агрессивных условиях морской среды, а также в учебном процессе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шалый Е.Е., Ким Л.В., Леонович С.Н. Имитационное моделирование деградации железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, Владивосток: Симпозиум РААСН-2016, VI Междунар. симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», 15–20 августа 2016.

2. Шалый Е.Е., Джоголюк А.Г., Ким Л.В., Леонович С.Н., Латыш А.В., Коледа Е.А. Уровень карбонизации бетона портовых сооружений Корсаковского порта, Саранск: Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы всероссийской научно-технической конф., посвященной памяти заслуженного деятеля науки Российской Федерации,

академика РААСН, докт. техн. наук, проф. Соломатова В.И. редкол.: В.П. Селяев [и др.]; отв. ред. Т.А. Низина. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2016, С. 235–238.

3. Шалый Е.Е., Ким Л.В., Леонович С.Н., Степенова А.В. Модель расчета глубины и распространения хлоридов в бетоне гидротехнических сооружений о. Сахалин, Современные технологии и развитие политического образования [Электронный ресурс]: междунар. научн. конфер., Владивосток, 19–23 сентября 2016 // Дальневост. федерал. ун-т; отв. ред.: А.Т. Беккер, В.И. Петухов. Электрон. дан. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 291–292 с., 2016. Режим доступа: <https://www.dvfu.ru/science/publishing-activities/catalogue-of-books-fefu/>. Загл. с экр. ISBN 978-5-7444-3855-5.

4. Leonovich S., Shalyi E., Falaleeva N., Kim L. The influence of carbon dioxide on the durability of offshore concrete, 26 International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE-2016, Rhodes, Greece, June 26 – July 1, 2016.

Информация об авторах

Шалый Евгений Евгеньевич, аспирант (соискатель) кафедры гидротехнических сооружений.

E-mail: john_shamali@mail.ru

Дальневосточный Федеральный Университет.

Россия, 690106, Владивосток, ул. Нерчинская, 40.

Ким Лев Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий конструкторской лабораторией МНОЦ «Арктика».

E-mail: kimlv2@yandex.ru

Дальневосточный Федеральный Университет.

Россия, 690950, Владивосток, ул. Суханова, 8.

Леонович Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология строительного производства», декан строительного факультета БНТУ.

E-mail: sleonovich@mail.ru

Белорусский национальный технический университет.

Беларусь, 220013, Минск, пр-т Независимости, 65.

Поступила в апреле 2018 г.

© Шалый Е.Е., Ким Л.В., Леонович С.Н., 2018

E.E. Shaly, L.V. Kim, S.N. Leonovich

REINFORCED CONCRETE UNDER INFLUENCE OF CARBONIZATION AND CHLORIDE AGGRESSION: PROBABLE MODEL OF SERVICE LIFE CALCULATION

The problem of determining the longevity of engineering hydraulic engineering and port facilities is extremely urgent today due to the development of the Northern Sea Route and the increase in oil production is actual. According to the official statistics, more than half of the port facilities are in unsatisfactory condition and require repair or reconstruction, which in turn requires considerable capital investment. Operational experience has shown that the average service life of most hydraulic structures is from 30 to 40 years, whereas the standard service life should be at least 50–100 years. Today, about 90 % of reinforced concrete port facilities have defects in concrete and reinforcement, which reduce durability and bearing capacity. In the process of operation these structures are usually exposed to a complex of severe aggressive influences, therefore it is important to provide at the design stage a number of factors that may affect the actual service life of their reinforced concrete elements. Existing design techniques do not fully reflect the actual operating conditions of hydraulic structures. This is particularly evident in areas where the simultaneous impact of

such factors is as low air temperatures and a large number of clear days in winter with strong solar radiation leads to a drastic change in the real operating conditions compared to the calculated ones. Concretes of many structures and structures experience great number of aggressive impacts than is provided for by design standards. Therefore, from the above, it follows that the problem of resource forecasting of reinforced concrete elements, both at the design stage and in the process of exploitation, has always been the least studied in the theory of structures and the most significant in the socioeconomic sense. A technique for predicting the durability of reinforced concrete structures under the combined effect of carbonization and chloride aggression using finite-difference and probability models is developed. The period of initiation of corrosion of the reinforcement and the period of propagation for the conditions of the shelf zone are taken into account. Sakhalin. Field surveys of the port facilities of Kholmsk and Korsakov have been carried out. The carbonization front and the chloride content were estimated from the depth of the protective layer of concrete. A model is proposed which allows determining the average period before repair, taking into account the rate of degradation of the protective layer of concrete from the simultaneous action of two corrosion processes: carbonization and chloride aggression.

Keywords: reinforced concrete, carbonization, chloride aggression, forecasting of service life, probabilistic model.

REFERENCES

1. Shalyi E.E., Kim L.V., Leonovich S.N. Imitating modeling of degradation of reinforced concrete designs of hydraulic engineering constructions. RAACS-2016 symposium, VI International symposium "Current problems of computer modeling of designs and constructions", Vladivostok, 2016.

2. Shalyi E.E., Dzhogolyuk A.G., Kim L.V., Leonovich S.N., Latvian A. V., Koleda E.A. Level of carbonization of concrete of port constructions of Korsakovsky port. Durability of construction materials, products and designs: materials of the All-

Russian scientific and technical conference, Saransk, 2016.

3. Shalyi E.E., Kim L.V., Leonovich S.N., Stepenova A.V. Model of calculation of depth and distribution of chlorides in concrete of hydrotechnical constructions of Sakhalin Island. Modern technologies and development of political education [Electronic resource]: international scientific conference, Vladivostok, 2016.

4. Leonovich S., Shalyi E., Falaleeva N., Kim L. The influence of carbon dioxide on the durability of offshore concrete (English), International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE-2016, Rhodes, Greece, 2016.

Information about the author

Evgeny E. Shalyi, Postgraduate student.

E-mail: john_shamali@mail.ru

Far Eastern Federal University.

Russia, 690106, Vladivostok, Nerchinskaya st., 40.

Lev V. Kim, PhD, Assistant professor, Associate Professor.

E-mail: kimlv2@yandex.ru

Far Eastern Federal University.

Russia, 690950, Vladivostok, Sukhanov st., 8.

Sergei N. Leonovich, PhD, Professor.

E-mail: sleonovich@mail.ru

Belarussian national technical university.

Belarus, 220013, Minsk, Nezavisimosti ave., 65.

Received in April 2018