

Вероятностный расчет глубины и распространения фронта карбонизации в бетоне гидротехнических сооружений

Асп. Е. Е. Шалый¹⁾, канд. техн. наук, доц. Л. В. Ким¹⁾, докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович²⁾, инж. А. В. Степанова³⁾

¹⁾Инженерная школа ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет» (Владивосток, Российская Федерация),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. На побережье Дальнего Востока России климат носит муссонный характер, который наиболее ярко выражен на юге, а к северо-востоку постепенно ослабевает. Сезонная смена океанического и континентального влияния отражается на характере климата: лето умеренно теплое и дождливое, зима холодная и малоснежная. С развитием Северного морского пути и наращиванием нефтедобычи на шельфе сегодня проблема определения долговечности инженерных гидротехнических и портовых сооружений является крайне актуальной. Согласно официальной статистике, больше половины портовых сооружений находятся в неудовлетворительном состоянии и нуждаются в ремонте 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 одновременно 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 вышесказанного 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. В статье рассматривается модель воздействия окружающей среды юга Дальнего Востока, связанная преимущественно с воздействием на гидротехнические железобетонные сооружения углекислого газа в окружающей среде и последующей коррозией бетона и арматуры.

Ключевые слова: бетон, арматура, хлориды, коррозия

Для цитирования: Вероятностный расчет глубины и распространения фронта карбонизации в бетоне гидротехнических сооружений / Е. Е. Шалый [и др.] // 2018. Т. 17, № 2. С. 106–113. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-106-113

Probabilistic Analysis of Depth and Carbonation Front Development in Concrete of Marine Structures

Е. Е. Shalyi¹⁾, L. V. Kim¹⁾, S. N. Leonovich²⁾, A. V. Stepanova³⁾

¹⁾School of Engineering Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The climate on the coast of the Russian Far East is monsoonal which is strongly pronounced in the south, and it is gradually weakening to the northeast. Seasonal change of oceanic and continental influence affects the nature of the climate:

Адрес для переписки

Шалый Евгений Евгеньевич
Инженерная школа ФГАОУ
ВПО «Дальневосточный федеральный университет»
ул. Пушкинская, 37,
690014, г. Владивосток, Приморский край,
Российская Федерация
Тел.: +7 423 226-88-18
john_shamali@mail.ru

Address for correspondence

Shalyi Evgeny E.
School of Engineering
Far Eastern Federal University
37 Pushkinskaya st.,
690014, Vladivostok, Primorskiy krai,
Russian Federation
Tel.: +7 423 226-88-18
john_shamali@mail.ru

summer is moderately warm and rainy and winter is cold and with little snow. Determination of longevity for engineering hydro-technical and port facilities is considered presently as an extremely urgent problem due to development of the Northern Sea Route and an increase in oil production on the shelf. According to official statistics more than half of the port facilities are in unsatisfactory condition and require repair or reconstruction and, in its turn, it requires considerable capital investment. Operational experience has shown that the average service life of most hydraulic engineering structures is 30–40 years, whereas the normative 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 course of operation these structures are usually exposed to a complex of severe aggressive actions, therefore it is important at the design stage to provide for a number of factors that may affect the actual life of their reinforced concrete elements. The existing design techniques do not fully reflect the actual operating conditions of hydraulic engineering structures. This is particularly evident in the areas where simultaneous impact of such factors as low air temperatures and a large number of clear days in winter with strong solar radiation leads to a drastic change in the actual operating conditions compared to the calculated ones. Concretes of many facilities and structures are affected by a great number of aggressive impacts than it is provided for by design standards. Therefore, from the above, it follows that the problem of forecasting the resource 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. The paper considers a model of the environmental impact of the south of the Far East, which is mainly associated with the action of carbon dioxide on hydraulic engineering reinforced concrete structures in the environment and subsequent corrosion of concrete and reinforcement.

Keywords: concrete, reinforcement, chlorides, corrosion

For citation: Shalyi E. E., Kim L. V., Leonovich S. N., Stepanova A. V. (2018) Probabilistic Analysis of Depth and Carbonation Front Development in Concrete of Marine Structures. *Science and Technique*. 17 (2), 106–113. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-106-113 (in Russian)

Обзор исследований

Начало изучения процессов газовой коррозии бетона и железобетона положено в [1–4], однако проблема до сих пор остается актуальной. Проникновение газов в железобетонные конструкции стимулирует коррозию арматуры. Глубина проникновения углекислого газа и условия его контакта с арматурой характеризуют долговечность бетона. Главные факторы, влияющие на протекание газовой коррозии в железобетонных конструкциях, следующие: отсутствие на поверхности арматуры пленки воды, минимальное содержание влаги, высокая температура, неоднородность химического состава арматуры.

Действие на железобетон газовых сред определяется видом и концентрацией кислоты, конденсирующейся на поверхности и в порах защитного слоя бетона. Агрессивное воздействие распространенных кислых газов CO_2 состоит в нейтрализации поверхностного слоя бетона и образовании в нем соединений, влияющих на его свойства. Углекислый газ в бетоне соединяется с растворенным гидроксидом кальция, нейтрализуя его и обуславливая потерю защитных свойств поверхностного слоя. Для решения вероятностной задачи за основу модели карбонизации принята модель Dura Crete [5–7], которая описывает осредненные данные и тенденции их изменения с течением времени.

Описание расчетной модели

Модель Dura Crete взята в [8]. Она удобна для практического применения инженерами и дает хорошую сходимость с испытаниями на коррозионную стойкость. Модель карбонизации, уточненная в [1, 2, 9], основана на первом законе диффузии Фика [3, 4, 10] и рассматривает влияние факторов окружающей среды

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

где x_c – глубина карбонизации, м; k_c – коэффициент твердения (уход за бетоном, т. е. сохранение при твердении бетона его влажностного состояния, которое исключает раннее высыхание, повышает степень гидратации, а проницаемость бетона для газов с увеличением длительности ухода снижается); ε_t – погрешность, обусловленная использованием ускоренного метода карбонизации, мм^2 ; $R_{ACC,0}^{-1}$ – обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне, определенное в условиях ускоренной карбонизации (ACC), $\text{м}^5/(\text{с}\cdot\text{кг CO}_2)$; t_{SL} – время эксплуатации конструкции или расчетный срок службы, год.

Таким образом, на основании первого закона Фика [3, 4, 10] из (1) получено уравнение

$$g(a, x_c(t_p)) = a - x_c(t_p) = a - \sqrt{2k_{RH}k_c(k_t R_{ACC.0}^{-1} + \varepsilon_t)C_s \cdot \sqrt{t_p} \cdot W(t_p)}, \quad (2)$$

где $x_c(t_p)$ – глубина карбонизации за время t_p , мм; C_s – концентрация CO_2 в окружающем воздухе, кг/м³; $W(t_p)$ – функция, учитывающая влияние климатических параметров.

Предполагается, что коэффициент диффузии для углекислого газа через материал является константой материала. Однако в общем случае коэффициент диффузии CO_2 в бетоне в течение времени эксплуатации может зависеть от большого количества факторов. Уравнение (2) лежит в основе полного вероятностного расчетного метода для коррозии карбонизации в бетоне без трещин, в котором толщина защитного слоя бетона сравнивается с глубиной карбонизации $x_c(t_p)$ за определенное время t_p .

Развитие карбонизации в значительной степени зависит от периодичности и длительности периодов увлажнения (табл. 1, 2)

$$w = a_w T_{0w}^{b_w}, \quad (3)$$

где a_w – параметр регрессии ($m = 0,50$); b_w – параметр регрессии при нормальном распределении ($m = 0,446$; $s = 0,163$).

Вероятность увлажнения поверхности дождем определяем по уравнению [11]

$$P_{SR} = \frac{\sum d(w_i \cap r)}{\sum d(r)}, \quad (4)$$

где $\sum d(w_i \cap r)$ – количество дней в течение одного года с ветром в направлении i во время дождя (при выпадении осадков $h \geq 2,5$ мм); $\sum d(r)$ – то же в течение одного года с дождем.

Верификация модели карбонизации

Принятые в расчетах вероятностные модели базисных переменных, входящих в функции состояния (2), представлены в табл. 3. Принятое условие: железобетонная конструкция экс-

плуатируется в различных районах Дальнего Востока и выполнена из бетона на портландцементе с расходом 450 кг/м³ при В/Ц = 0,37. Расчетные районы Дальнего Востока показаны на рис. 1, а глубины карбонизации x_c и распространение фронтов карбонизации v_k по принятой математической модели для этих районов представлены в табл. 4–12.

Таблица 1

Статистические параметры среднегодовой относительной влажности RH_{real} для Дальнего Востока
Statistical parameters of average annual relative humidity RH_{real} for Far East

Название местности	Значение относительной влажности, %		
	Среднее μ	Минимальное a_r	Максимальное b_r
Северо-восточная часть о. Сахалин	84	77	100
Восточная часть о. Сахалин	79	75	100
Юго-восточная часть о. Сахалин	81	74	100
Ванино	81	75	100
Пос. Де-Кастри	80	77	100
Николаевск-на-Амуре	83	74	100
Владивосток	84	61	100
Пос. Славянка	73	64	100
Находка	83	72	100

Таблица 2

Среднее количество дней с дождем и влажное время
Average number of rainy days and humid period

Название местности	Количество дней с осадками за 2013 г., $h_{Nd} \geq 2,5$ мм/год	Влажное время T_{0w}
Северо-восточная часть о. Сахалин	167	0,464
Восточная часть о. Сахалин	147	0,408
Юго-восточная часть о. Сахалин	99	0,275
Ванино	153	0,452
Пос. Де-Кастри	95	0,264
Николаевск-на-Амуре	137	0,381
Владивосток	166	0,461
Пос. Славянка	130	0,361
Находка	103	0,286

Вероятностные модели базисных переменных, характеризующих свойства материалов, условия эксплуатации конструкции, применяемые для вероятностного расчета глубины и скорости карбонизации железобетонного элемента

Probabilistic models of base variables characterizing material properties, operational conditions of structures which are applied for probability calculation of depth and rate of reinforced element carbonization

Параметр	Единица измерения	Тип распределения	Среднее значение (μ), стандартное отклонение (σ), нижняя и верхняя абсолютные границы (a, b)								
			Северо-восточная часть о. Сахалин	Восточная часть о. Сахалин	Юго-восточная часть о. Сахалин	Ванино	Де-Кастри	Николаевск-на-Амуре	Владивосток	Славянка	Находка
$RH_{real}(k_c)$	%	Бега (с верхним и нижним пределами)	$\mu = 84$ $\sigma = 4,6$ $a_r = 77$ $b_r = 100$	$\mu = 79$ $\sigma = 3,9$ $a_r = 75$ $b_r = 100$	$\mu = 81$ $\sigma = 5,2$ $a_r = 74$ $b_r = 100$	$\mu = 81$ $\sigma = 6,1$ $a_r = 75$ $b_r = 100$	$\mu = 80$ $\sigma = 3,5$ $a_r = 77$ $b_r = 100$	$\mu = 83$ $\sigma = 5,7$ $a_r = 74$ $b_r = 100$	$\mu = 84$ $\sigma = 12,58$ $a_r = 61$ $b_r = 100$	$\mu = 73$ $\sigma = 6,18$ $a_r = 64$ $b_r = 100$	$\mu = 83$ $\sigma = 10,69$ $a_r = 72$ $b_r = 100$
$RH_{ref}(k_c)$	%	det	65/(-)								
g_e	-	det	2,5								
f_e	-	det	5,0								
t_c	дни	det	1								
b_c	-	N	$\mu = -0,567 / \sigma = 0,024$								
k_t	-	LN	$\mu = 1,25 / \sigma = 0,35$								
$R_{ACC,0}^{-1}$	(мм ² /год)/(кг/м ³)	LN	$\mu = 1552$								
ε_i	(мм ² /год)/(кг/м ³)	LN	$\mu = 315,5 / \sigma = 48$								
C_s	кг/м ³	LN	$\mu = 8,15 \cdot 10^{-4} / \sigma = 1 \cdot 10^{-4}$								
b_w	-	LN	$\mu = 0,446 / \sigma = 0,163$								
T_{0W}	-	det	0,464	0,408	0,275	0,452	0,264	0,381	0,461	0,361	0,286
$p_{SR}(W)$	-	det	0,240	0,359	0,239	0,248	0,190	0,300	0,367	0,338	0,267
$t_0(W)$	ГОДЫ	det	0,0767 (равно 28 дней)								
a	ММ	det	50								
Δa	ММ	N	$\mu = +5 / \sigma = 5$								
t_p	ГОДЫ	det	1-100								

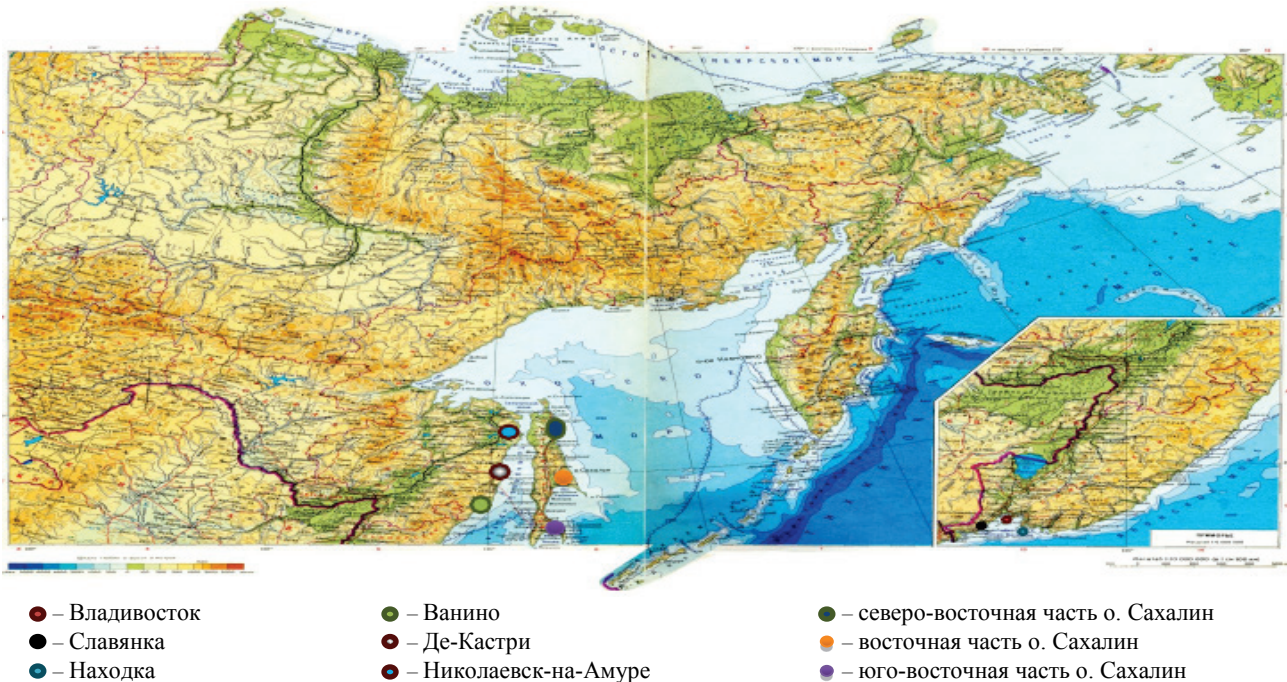


Рис. 1. Расчетные районы Дальнего Востока

Fig. 1. Calculation regions of Far East

Таблица 4

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для северо-восточной части о. Сахалин
Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for North-Eastern part, Sakhalin Island

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	10,54	1,0540000
25	16,67	0,6668000
30	18,26	0,6086667
50	23,57	0,4714000
100	33,33	0,3333000

Таблица 5

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для восточной части о. Сахалин
Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for Eastern part, Sakhalin Island

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	12,970	1,2970000
25	20,500	0,8200000
30	22,460	0,7486667
50	28,996	0,5799200
100	41,010	0,4101000

Таблица 6

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для юго-восточной части о. Сахалин
Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for South-Eastern part, Sakhalin Island

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	11,88	1,1880
25	18,78	0,7512
30	20,58	0,6860
50	26,56	0,5312
100	37,57	0,3757

Таблица 7

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для г. Ванино
Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for town Vanino

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	28,5000	2,850000
25	45,0544	1,802176
30	49,3500	1,645000
50	63,7200	1,274400
100	90,1100	0,901100

Таблица 8

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для пос. Де-Кастри
Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for township De-Kastri

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	18,51	1,8510000
25	29,26	1,1704000
30	32,05	1,0683333
50	41,38	0,8276000
100	58,52	0,5852000

Таблица 9

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для г. Николаевска-на-Амуре
Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for town Nikolayevsk-on-Amur

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	23,780	2,37800
25	37,597	1,50388
30	41,190	1,37300
50	53,170	1,06340
100	75,190	0,75190

Таблица 10

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для г. Владивостока
Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for town Vladivostok

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	20,76	2,076000000
25	32,83	1,313200000
30	35,96	1,198666667
50	46,42	0,928400000
100	65,65	0,656500000

Таблица 11

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для пос. Славянка

Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for township Slavyanka

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	26,37	2,637000000
25	41,69	1,667600000
30	45,67	1,522333333
50	58,96	1,179200000
100	83,38	0,833800000

Таблица 12

Глубина карбонизации x_c и распространение фронта карбонизации v_k по принятой математической модели для г. Находки

Carbonation depth x_c and carbonation front development v_k according to accepted mathematical model for town Nakhodka

Срок эксплуатации, годы	x_c , мм	v_k , мм/год
10	17,2	1,720000000
25	27,2	1,088000000
25	27,2	1,088000000
30	29,8	0,993333333
50	38,47	0,769400000
100	54,4	0,544000000

Экспериментальные исследования карбонизации на портовых сооружениях о. Сахалин. Проверка адекватности модели карбонизации

Для уточнения результатов вероятностного моделирования (рис. 2, 3) проникновения углекислого газа в бетон гидротехнических сооружений отдельно выполнено обследование причальных сооружений острова Сахалин и определение карбонизации бетона посредством фенолфталеиновой пробы (рис. 4).

Пробы показали, что на гидротехнические сооружения со стороны моря карбонизация оказывает незначительное воздействие. Однако со стороны территории портов, а также в зоне переменного уровня наблюдается проникновение углекислого газа на всю глубину защитного слоя бетона (рис. 4).

Измерение прочностных характеристик причального сооружения выполняли с помощью ультразвукового прибора «Пульсар 2.1» и склерометра Original-Schmidt. Результаты исследований приведены в табл. 13.

По результатам табл. 13 можно сделать вывод, что наибольшие потери прочности произошли в бетоне зоны переменного уровня надстройки. Потеря прочности случилась из-за отслоения гидроизоляции с последующей коррозией бетона в результате воздействия на сооружение углекислого газа воздуха, хлоридов и сульфатов морской воды.

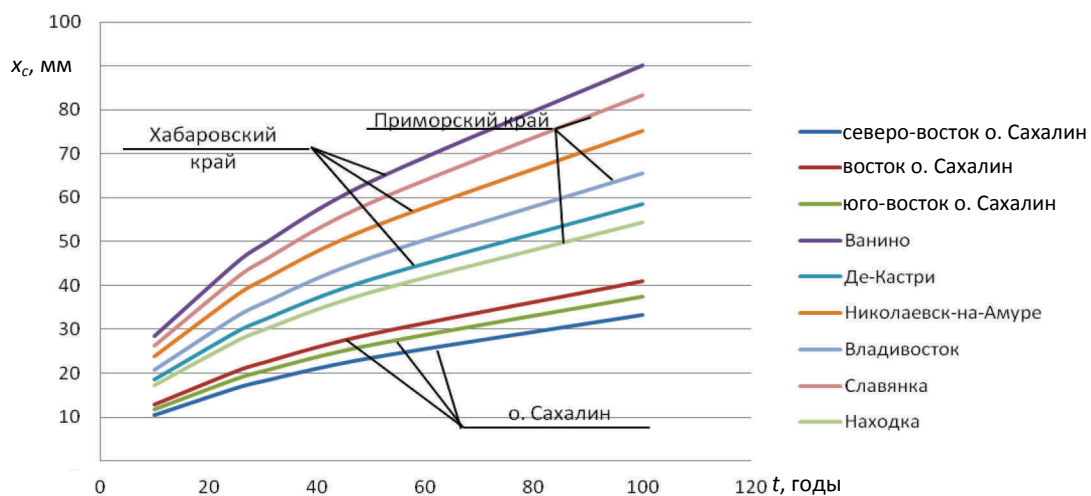


Рис. 2. Рост глубины карбонизации с течением времени для различных районов Дальнего Востока

Fig. 2. Carbonation depth growth due to time period for various regions of Far East

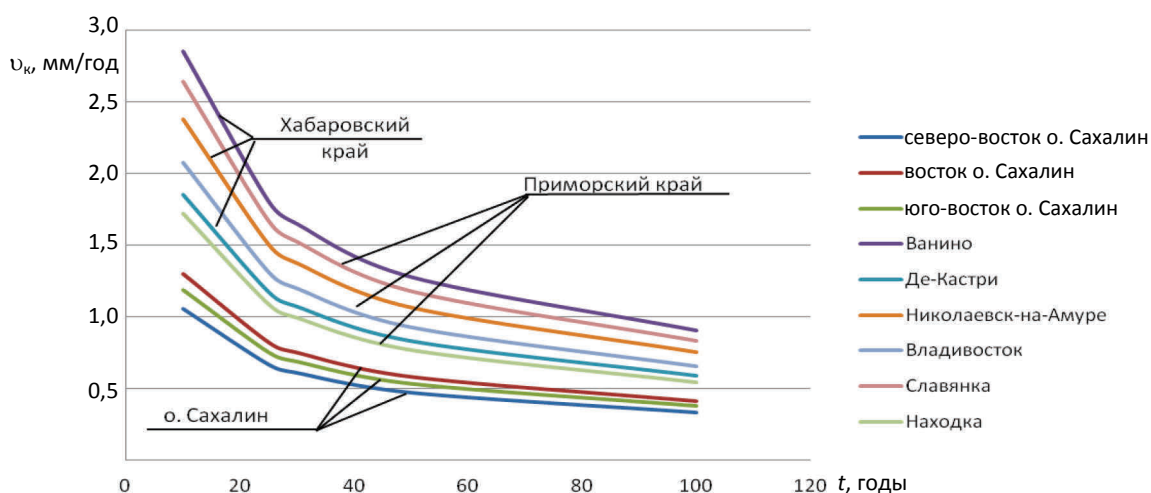


Рис. 3. Изменение скорости перемещения фронта карбонизации с течением времени для различных районов Дальнего Востока

Fig. 3. Changes in displacement rate of carbonation front due to time period for various regions of Far East

Таблица 13

Результаты испытаний защитного слоя бетона методами неразрушающего воздействия
Test results for concrete protective layer while using method without destructiveness

Способ и характеристика измерения	Место измерения			
	Холмский морской торговый порт		Корсаковский морской торговый порт	
	Лицевая причальная стенка	Железобетонная надстройка	Лицевая причальная стенка	Железобетонная надстройка
Склерометр (R_m , МПа)	40,0	33,7	36,2	32,6
Пульсар 2.1 (R_m , МПа)	40,4	41,9	41,7	30,8
Общая оценка прочности (R_m , МПа)	40,2	37,8	38,95	31,7
Соответствие классу бетона	B30	B30	B30	B25
Класс бетона по проекту	B30	B30	B30	B30



Рис. 4. Фенолфталеиновая проба

Fig. 4. Phenolphthalein sample

ВЫВОДЫ

1. На основе предложенных вероятностных моделей и при использовании полученных мо-

делей базисных переменных выполнены моделирование глубины и скорости карбонизации бетона, а также анализ концентрации хлоридов на некоторой глубине защитного слоя бетона для условий о. Сахалина.

2. Различия по карбонизации для вероятностного подхода при натурном определении глубины проникновения углекислого газа в бетон защитного слоя и натурных исследованиях на период 30 лет составляют до 7 %. Поэтому в дальнейшем, оперируя значениями, полученными в ходе вероятностного моделирования, можно достаточно точно рассчитать срок службы бетона шельфовых конструкций в данном районе и надежно определить возможность эксплуатации конструкции без специальной (вторичной) защиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gehlen, C. Probabilistic Lebensdauerberechnung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur Wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. RWTH-Aachen, 2000.
2. Dura Crete: Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures: Statistical Quantification of the Variables in the Limit State Functions. Report No BE 95-1347–2000. P. 62–63.
3. Алексеев, С. Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. М.: Стройиздат, 1976. 205 с.
4. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев [и др.]. М.: Стройиздат, 1990. 247 с.
5. Dura Crete: Brite EuRam III Project BE95-1347, Report R4-5, Modeling of Degradation, 1998.
6. Eurocode 1: DIN V ENV 1991. Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkung auf Tragwerke. Teil 1–4. 1991.
7. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1–1: General Rules and Rules for Buildings: EN 1992-1-1:2004 (E). Brussels: European Committee for Standardization, 2004. 225 p.
8. Roberts, M. H. Carbonation of Concrete Made with Dense Natural Aggregates, BRE, Information Sheet. 1981.
9. Durable Concrete Structures: Design Guide / CEB – Comité Euro International du Béton. London: Thomas Telford, 1992.
10. Несущие и ограждающие конструкции: СНиП 3.03.01–87. Введ. 01.07.1988. М.: ЦНИИОМТП, 1987. 190 с.
11. Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов. М.: Информавтодор, «Росавтодор» Минтранса, 2002. 140 с.

Поступила 10.06.2016

Подписана в печать 26.01.2017

Опубликована онлайн 30.03.2018

REFERENCES

1. Gehlen C. (2000) *Probabilistic Lebensdauerberechnung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur Wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion*. RWTH-Aachen (in German).
2. *Dura Crete: Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures: Statistical Quantification of the Variables in the Limit State Functions*. Report No BE 95-1347–2000, 2000, 62–63.
3. Alexeev S. N., Rozental N. K. (1976) *Corrosion Resistance of Reinforced Concrete Structures in Aggressive Industrial Environment*. Moscow, Sroyizdat Publ. 205 (in Russian).
4. Alekseev S. N., Ivanov F. M., Modry S., Shissl' P. (1990) *Durability of Reinforced Concrete in Aggressive Environments*. Moscow, Sroyizdat Publ. 247 (in Russian).
5. Dura Crete: Brite EuRam III Project BE95-1347, Report R4-5, Modeling of Degradation, 1998.
6. Eurocode 1: DIN V ENV 1991. Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkung auf Tragwerke. Teil 1–4. 1991.
7. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1–1: General Rules and Rules for Buildings: EN 1992-1-1:2004 (E). Brussels: European Committee for Standardization, 2004. 225.
8. Roberts M. H. (1981) *Carbonation of Concrete Made with Dense Natural Aggregates*, IP6/81. Building Research Establishment, Garston, 1981.
9. CEB – Comité Euro International du Béton (1992). *Durable Concrete Structures: Design Guide*. London, Thomas Telford.
10. SNiP [Construction Norms and Regulations] 3.03.01–87. *Bearing and Enclosing Structures*. Moscow, Central Scientific Research Institute of Organization, Mechanization and Assistance to Construction, 1987. 190 (in Russian).
11. *Methodology for Computed Prediction of Service Life for Reinforced Concrete Superstructures of Highway Bridges*. Moscow, Publishing House “Informavtodor”, “Rosavtodor”, Ministry of Transport, 2002. 140 (in Russian).

Received: 10.06.2016

Accepted: 26.01.2017

Published online: 30.03.2018