

## ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ ГЛУБИНЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА КАРБОНИЗАЦИИ В БЕТОНЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ХАБАРОВСКОГО КРАЯ

**Шалый Е.Е.**, аспирант, **Ким Л.В.**, канд. техн. наук, доцент (ДФУ),  
**Леонович С.Н.**, д-р техн. наук, профессор (БНТУ).

**Аннотация.** Климат Хабаровского края — муссонный, с характерной холодной зимой и влажным жарким летом. Климатические условия существенно изменяются с характером рельефа, близостью к морю и с севера на юг. Прибрежные районы края имеют умеренный муссонный климат. Преобладающими являются ветры юго-западного (в холодное время года) и северо-восточного (в теплое время года) направлений. Увлажнение территории водосбора избыточное. Минимальное количество осадков выпадает зимой и значительно увеличивается в летние месяцы. В таких условиях, коррозия материала гидротехнических сооружений происходит наиболее интенсивно. В статье рассматривается коррозия бетона, который благодаря своим положительным свойствам один из наиболее востребованных, на сегодняшний день, материалов в сфере гидротехнического строительства. Бетоны в эксплуатационных условиях, особенно подвержены агрессивному действию распространенных кислотных газов CO<sub>2</sub>, которое состоит в нейтрализации поверхностного слоя бетона и образования в нем соединений, влияющих на его свойства.

За основу модели карбонизации (проникновения кислотных газов CO<sub>2</sub>) Хабаровского края, для решения вероятностной задачи, принята модель Dura Crete [2] которая описывает осредненные данные и тенденции их изменения с течением времени. Модель Dura Crete [2] взята у Schiessl P. [3]. Она удобна для практического применения инженерами и дает хорошую сходимость с испытаниями на коррозионную стойкость. Модель карбонизации, уточненная Gehlen [1], основана на первом законе диффузии Фика и рассматривает влияние факторов окружающей среды.

Уравнение (1) 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  $t_p$

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

где  $x_c(t_p)$  — глубина карбонизации за время  $t_p$ , мм;  $R_{ACC,0}^{-1}$  — обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне (мм<sup>2</sup>/год)/(кг/м<sup>3</sup>);  $\varepsilon_t$  — погрешность, обусловленная использованием ускоренного метода карбонизации (мм<sup>2</sup>/год)/(кг/м<sup>3</sup>);  $C_s$  — концентрация CO<sub>2</sub> в окружающем

воздухе, кг/м<sup>3</sup>;  $W(t_p)$  – функция, учитывающая влияние климатических параметров.

Таблица 1 – Статистические параметры среднегодовой относительной влажности  $RH_{real}$  для Хабаровского края

Город	Значение относительной влажности, %		
	Среднее $\mu$	Минимальное $a_r$	Максимальное $b_r$
Ванино	81	75	100
Де-Кастри	80	77	100
Николаевск-на-Амуре	83	74	100

Развитие карбонизации в значительной степени зависит от периодичности и длительности периодов увлажнения

$$w = a_w \cdot T_{oW}^{b_w}, \quad (2)$$

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

Таблица 2 - Среднее количество дней с дождем и влажное время

Город	Количество дней с осадками $h_{Nd} \geq 2,5$ мм в год	$T_{oW}$ – влажное время, годы
	2013 год	
Ванино	153	0,452
Де-Кастри	95	0,264
Николаевск-на-Амуре	137	0,381

Из уравнения (1) выводится уравнение для расчета глубины карбонизации в некоторый момент времени  $t_p$

$$x_c(t_p) = \sqrt{2 \cdot k_{RH} \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t)} \cdot C_s \cdot \sqrt{t_p} \cdot W(t_p). \quad (3)$$

Путем деления значения глубины карбонизации  $x_c(t_p)$  на время можно получить формулу для расчета скорости перемещения фронта карбонизации бетона:

$$v_k = \frac{\sqrt{2 \cdot k_{RH} \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t)} \cdot C_s \cdot \sqrt{t_p} \cdot W(t_p)}{t_p}. \quad (4)$$

В таблице 3 представлены принятые в расчетах вероятностные модели базисных переменных, входящих в функции модели (3), (4). Принятое условие: железобетонная конструкция эксплуатируется в трех различных

частях юго-восточного побережья Хабаровского края и выполнена из бетона на портландцементе ( $450 \text{ кг/м}^3$ ) с В/Ц = 0,37.

Таблица 3 – Вероятностные модели базисных переменных, характеризующих свойства материалов, условия эксплуатации конструкции, применяемые для вероятностного расчета глубины и скорости карбонизации железобетонного элемента.

Параметр	Ед. изм.	Тип распределения	Среднее значение ( $\mu$ ), стандартное отклонение ( $\sigma$ ), нижняя и верхняя абсолютные границы (a, b)		
			<u>Ванино</u>	<u>Де-Кастри</u>	<u>Николаевск-на-Амуре</u>
$RH_{real}(k_c)$	%	Бета (с верхним и нижним пределом)	$\mu=81$ $\sigma=6,1$ $ar=75$ $br=100$	$\mu=80$ $\sigma=3,5$ $ar=77$ $br=100$	$\mu=83$ $\sigma=5,7$ $ar=74$ $br=100$
$RH_{ref}(k_c)$	%	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	$\mu= 1,25 / \sigma= 0,35$		
$R_{ACC,0}^{-1}$	( $\text{мм}^2/\text{ГОД}$ )/( $\text{кг}/\text{м}^3$ )	LN	$\mu=1552$		
$\varepsilon_t$	( $\text{мм}^2/\text{ГОД}$ )/( $\text{кг}/\text{м}^3$ )	LN	$\mu=315,5 / \sigma= 48$		
$C_S$	$\text{кг}/\text{м}^3$	LN	$\mu= 8,15 \times 10^{-4} / \sigma= 1 \times 10^{-4}$		
$b_w$		LN	$\mu=0,446 / \sigma=0,163$		
$T_{0W}$	–	det	0,452	0,264	0,381
$p_{SR}(W)$	–	det	0,248	0,190	0,300
$t_0(W)$	ГОДЫ	det	0,0767 (равно 28 дней)		
$a$	мм	det	50		
$\Delta a$	мм	N	$\mu=+5 / \sigma= 5$		
$t_p$	ГОДЫ	det	1-100		

Таблица 4 – Глубина карбонизации ( $x_c$ ) и распространение фронта карбонизации ( $v_k$ ), по принятой математической модели для города Ванино

Срок эксплуатации, ГОДЫ	Глубина карбонизации ( $x_c$ ) и распространение фронта карбонизации ( $v_k$ ), по принятой математической модели	
	$x_c$ , мм	$v_k$ , мм/ГОД
10	28.5	2.85
25	45.0544	1.802176

30	49.35	1.645
50	63.72	1.2744
100	90.11	0.9011

Таблица 5 – Глубина карбонизации ( $x_c$ ) и распространение фронта карбонизации ( $v_k$ ), по принятой математической модели для пос. Де-Кастри.

Срок эксплуатации, годы	Глубина карбонизации ( $x_c$ ) и распространение фронта карбонизации ( $v_k$ ), по принятой математической модели	
	$x_c$ , мм	$v_k$ , мм/ГОД
10	18.51	1.851
25	29.26	1.1704
30	32.05	1.0683333
50	41.38	0.8276
100	58.52	0.5852

Таблица 6 - Глубина карбонизации ( $x_c$ ) и распространение фронта карбонизации ( $v_k$ ), по принятой математической модели для города Николаевск-на-Амуре.

Срок эксплуатации, годы	Глубина карбонизации ( $x_c$ ) и распространение фронта карбонизации ( $v_k$ ), по принятой математической модели	
	$x_c$ , мм	$v_k$ , мм/ГОД
10	23.78	2.378
25	37.597	1.50388
30	41.19	1.373
50	53.17	1.0634
100	75.19	0.7519

**Вывод.** Вероятностные расчеты карбонизации бетона показали, что одна и та же железобетонная конструкция, произведенная с расходом портландцемента  $450 \text{ кг/м}^3$  с В/Ц = 0,37 при эксплуатации в различных частях юго-восточного побережья Хабаровского края будет характеризоваться максимальной глубиной и скоростью карбонизации бетона. При этом различия по глубине и скорости карбонизации для этих районов, на период 50 лет составляет до 35 %.

**Литература.** 1. Gehlen C. Probabilistic Lebensdauerberechnung von Stahlbetonbauwerken– ZuverLassigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion, ThesisD82, Aachen, 2000. 2. BE95-1347 DuraCrete: Brite EuRam III Project. Modeling of Degradation. 1998. 3. Roberts M.H. Carbonation of concrete made with dense natural aggregates. BRE, Information

Sheet, 1981. 4. BE95-1347 DuraCrete – Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures. 2000. P. 62-63. 5. CEB – Comité Euro International du Béton. Durable Concrete Structures – Design Guide, Thomas Telford, London, 1992. 6. Dura Crete: Brite EuRam III Project BE95-1347, Report R4-5, Modeling of Degradation, 1998. 7. 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.