

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ,  
ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС ДЕПАССИВАЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МОСТОВЫХ ПЕРЕХОДОВ  
В КОМПЛЕКСЕ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

Р. Ю. ДОЛОМАНЮК

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Для Республики Беларусь, входящей в единую транспортную систему Европы и имеющей на своей территории около 6,5 тыс. мостов, обеспечение их бесперебойной работы является важнейшей государственной задачей. Проектный срок службы мостов составляет 100 лет. Однако практика эксплуатации мостовых сооружений показывает, что наибольшее коррозионное воздействие на железобетон оказывают хлориды щелочных и щелочноземельных металлов, широко используемых в реагентах на дорогах в зимний период (более 250 тыс. т).

Все чаще в инженерной практике наряду с конструкционным проектированием строительных железобетонных конструкций используется зарубежный термин «durability design» или «service life design», что переводится как проектирование долговечности или срок службы. Считается, что обеспечить заданный срок службы можно путем соблюдения определенных нормативных конструктивных требований (минимальный защитный слой бетона, водоцементное отношение, расход цемента и т. д.). В мостостроительной практике выделяют два основных подхода к прогнозированию долговечности мостов. Первый основывается на функции деградации конструкций мостов, для которой необходимо большое число опытных данных. Второй подход базируется на прогнозировании изменения состояния стальной арматуры в бетоне с точки зрения физико-механических процессов, протекающих в конструкции под воздействием различных факторов окружающей среды с учетом влияния транспортных процессов [1].

Предложенная модель деградации железобетонных конструкций на прогнозе коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне представляется дифференциальными уравнениями, в результате решения которых получено выражение карбонизации защитного слоя бетона  $t_{carb}$  и накопление критической концентрации хлоридов у поверхности стальной арматуры  $t_{Cl}$ , лет:

$$t_p = \frac{x_c^2}{2k_w^2 k_f^2 D_{CO_2} a^{-1} (c_1 - c_2)}, \quad t_{Cl} = \frac{x_c^2}{4D_{Cl} \cdot \left( \operatorname{erf}^{-1} \cdot \left( \frac{C_s - C_{crit}}{C_s} \right) \right)^2},$$

где  $t_p$  – срок службы, лет;  $x_c$  – глубина карбонизации за время службы конструкции, м;  $k_w$  – коэффициент, учитывающий влияние погодных условий;  $k_f$  – коэффициент влияния морозной деструкции;  $D_{CO_2}$  – коэффициент диффузии  $CO_2$  в бетоне,  $m^2/c$ ;  $a$  – реакционная емкость бетона (количество  $CO_2$ , необходимое для превращения всех способных карбонизироваться продуктов гидратации цемента),  $kg/m^3$ ;  $c_1$ ,  $c_2$  – соответственно содержание диоксида углерода на внешней поверхности бетона и на границе карбонизации (бесконечно малая величина),  $kg/m^3$ ;  $D_{Cl}$  – коэффициент диффузии хлоридов в бетоне,  $m^2/c$ ;  $\operatorname{erf}()$  – функция ошибок Гаусса;  $C_s$  и  $C_{crit}$  – концентрация хлоридов на поверхности арматуры, % по массе цемента [1].

В результате исследований параметров, влияющих на период инициирования коррозии стальной арматуры, установлено:

а) коэффициент влияния влажности за период наблюдений 1981–2010 гг. в течение времени имеет значения от 0,4 до 0,08. Глубина карбонизации за время службы конструкции в зависимости от коэффициента влияния влажности будет варьироваться во времени от 1 года до 100 лет в пределах от 0,1 до 5,6 мм (рисунок 1);

б) коэффициент влияния морозного разрушения в нашей климатической зоне составляет 1,14–4,24 мм на 0,0001 при сроке до 10 лет и 4,47–14,14 мм на 0,001 – от 10 до 100 лет (рисунок 2);

в) реакционная емкость бетона для элементов пролетных строений лежит в пределах от 24,9 до 30,4  $cm^3$  бетонной смеси (рисунок 3). Среднее значение коэффициента диффузии углекислого газа в железобетоне мостовых элементов варьируется в пределах от  $2,5 \cdot 10^{-5}$  до  $5 \cdot 10^{-5} cm^2/c$  [2];

г) коэффициент диффузии хлоридов в бетоне  $D_{Cl}$  является определяющим параметром при оценке долговечности железобетонных элементов по физическим моделям деградации. Этот коэффициент определяется как скорость переноса диффундирующего вещества (хлорида) через единицу площади, деленную на пространственный градиент концентрации вещества (хлорида) и измеряется в  $см^2/с$ . Сложность определения  $D_{Cl}$  состоит в том, что для получения значений требуются длительные сроки воздействия  $CO_2$  воздуха на бетон. Значение коэффициента диффузии приведены в таблице 1.

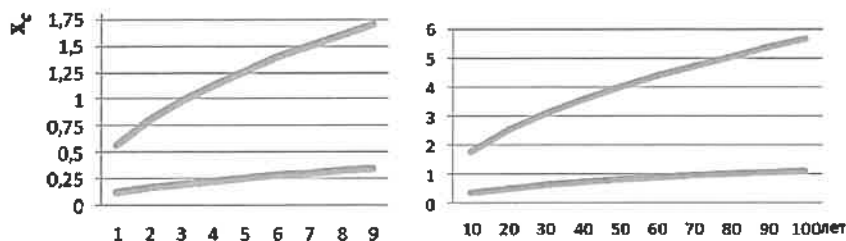


Рисунок 1 – Глубина карбонизации во времени от 1 года до 100 лет в зависимости от коэффициента влияния влажности

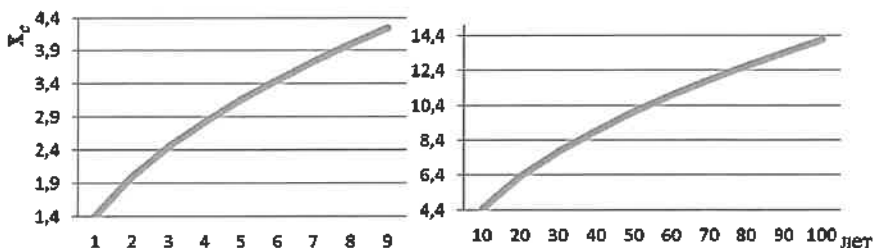


Рисунок 2 – Глубина карбонизации во времени от 1 года до 100 лет в зависимости от коэффициента влияния морозного разрушения

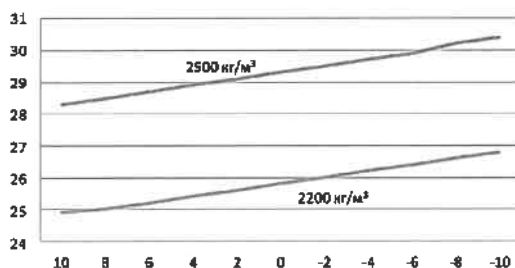


Рисунок 3 – Зависимость реакционной емкости бетона от его плотности и температуры

Таблица 1 – Коэффициент диффузии хлоридов в бетоне

$D_{Cl}, м^2/с$	Максимальное В/Ц					
	0,25	0,3	0,4	0,45	0,51	0,55
1 год	$2,359^{-12}$	$2,115^{-12}$	$1,701^{-12}$	$1,526^{-12}$	$1,339^{-12}$	$1,227^{-12}$
5 лет	$1,853^{-12}$	$1,305^{-12}$	$6,479^{-13}$	$4,564^{-13}$	$2,998^{-13}$	$2,265^{-13}$
10 лет	$1,670^{-12}$	$1,060^{-12}$	$4,274^{-13}$	$2,714^{-13}$	$1,573^{-13}$	$1,094^{-13}$
50 лет	$1,311^{-12}$	$6,542^{-13}$	$1,627^{-13}$	$8,117^{-14}$	$3,522^{-14}$	$2,019^{-14}$
100 лет	$1,182^{-12}$	$5,314^{-13}$	$1,073^{-13}$	$4,826^{-14}$	$1,848^{-14}$	$9,752^{-15}$

Модель прогноза долговечности железобетонных элементов мостовых сооружений на стадии проектирования позволяет определить их сроки службы в виде функции времени в зависимости от физико-механических свойств бетона и стальной арматуры, а также условий эксплуатации.

#### Список литературы

- 1 Васильев, А. А. Модель прогнозирования долговечности железобетонных пролетных строений мостов / А. А. Васильев, Р. Ю. Доломанюк, С. В. Дашкевич // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2018. – № 1 (36). – С. 121–123.
- 2 Доломанюк, Р. Ю. Оценка расчета коэффициента диффузии углекислого газа в железобетонных элементах мостовых конструкций / Р. Ю. Доломанюк // Международный научно-практический журнал «Интеграция наук». – М. – 2018. – № 7 (22). – С. 146–150.