

С.Н. ЛЕОНОВИЧ, д-р техн. наук, Белорусский национальный технический университет (Минск); О.Ю. ЧЕРНЯКЕВИЧ, преподаватель, Брестский государственный политехнический колледж

Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций при карбонизации

Коррозия арматуры, являющаяся важнейшей проблемой долговечности железобетонных конструкций, как правило, обуславливается карбонизацией окружающего ее бетона. Из-за различий в условиях изготовления и эксплуатации конструкций расчет защитного слоя бетона на стадии проектирования является прогнозным. Применение вероятностных методов к моделированию процесса карбонизации позволяет получать прогнозные оценки глубины и скорости карбонизации бетона и, как следствие, назначать минимальную толщину защитного слоя бетона для заданного расчетного срока эксплуатации конструкций.

В данной работе решались следующие задачи: провести параметрические исследования изменчивости базисных переменных, входящих в полную вероятностную модель карбонизации бетона и характеризующих свойства бетонной смеси (тип цемента, В/Ц, условия твердения бетона), воздействия окружающей среды на конструкции (влажность, дождь, концентрация CO₂); разработать вероятностные модели базисных переменных.

Уравнение предельного состояния для депассивированной арматуры, т. е. для арматуры, не имеющей защитной пленки, предохраняющей от коррозии:

$$P\{ \} = P_{\text{ден}} \{ a - x_c(t) < 0 \} < P_0, \quad (1)$$

где $P\{ \}$ – вероятность депассивации; a – толщина защитного слоя бетона, мм; $x_c(t)$ – глубина карбонизации за время t , мм; t – расчетный срок службы, год; P_0 – заданная вероятность наступления предельного состояния.

Определить срок службы конструкции t можно с использованием функции:

$$g(a, x_c(t)) = a - x_c(t) = a - k\sqrt{t}, \quad (2)$$

где $g(a, x_c(t))$ – функция состояния, определяющая остаточную толщину защитного слоя после эксплуатации конструкции в течение времени t ; k – величина, характеризующая скорость процесса карбонизации (мм/год^{0,5}).

На основании первого закона Фика из уравнения (2) получено уравнение (3). При этом предполагается, что коэффициент диффузии для углекислого газа через материал является константой материала. Однако в общем случае коэффициент диффузии CO₂ в бетоне в течение времени эксплуатации может зависеть от большого количества факторов. Уравнение (3) лежит в основе полного вероятностного расчетного метода для карбонизации бетона без трещин, в котором толщина защитного слоя бетона сравнивается с глубиной карбонизации $x_c(t)$ за определенное время t .

$$g(a, x_c(t)) = a - x_c(t) = a - \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_f \cdot R_{\text{acc.o}}^{-1} + \varepsilon_i) \cdot C_s \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)}, \quad (3)$$

где $x_c(t)$ – глубина карбонизации за время t , мм; k_e – коэффициент относительной влажности окружающей среды; k_c – коэффициент твердения; k_f – коэффициент регрессии; $R_{\text{acc.o}}^{-1}$ – обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне, (мм²/год)/(кг/м³); ε_i – погрешность, обусловленная использованием ускоренного метода карбонизации, (мм²/год)/(кг/м³); C_s – концентрация CO₂ в окружающем воздухе (кг/м³); $W(t)$ – функция, учитывающая влияние климатических параметров.

Имеется три уровня для статистического определения толщины защитного слоя при расчете долговечности.

1. Без требований к качеству изготовления:
бета-распределение: $\mu = a_{\text{аз.с.ном}}$; $\sigma = 10$ мм;
 $b = 5c_{\text{ном}} \leq d_{\text{element}}$
2. Обыкновенные требования к качеству изготовления:
бета-распределение: $\mu = a_{\text{аз.с.ном}}$; $\sigma = 8$ мм;
 $b = 5c_{\text{ном}} \leq d_{\text{element}}$
3. Специальные требования к качеству изготовления:
бета-распределение: $\mu = a_{\text{аз.с.ном}}$; $\sigma = 6$ мм;
 $b = 5c_{\text{ном}} \leq d_{\text{element}}$

где μ – среднее квадратическое отклонение; σ – среднее значение.

Рекомендуется при вероятностном моделировании отклонений толщины защитного слоя бетона Δa принимать следующие параметры: $\mu = 0 \pm 10$ мм; $\sigma = 5-10$ мм.

Таблица 1

Класс	Условный расчетный срок службы, лет	Примеры
1	1–5	Временные конструкции
2	25	Заменяемые конструктивные элементы и детали, например подкрановые балки, опоры
3	50	Здания и другие обычные конструкции, отличные от перечисленных ниже
4	100 или более	Монументальные здания и другие специальные и значимые конструкции, крупные мосты

Таблица 2

Город	Среднее значение μ относительной влажности, %	Минимальная относительная влажность a , %	Максимальная относительная влажность b , %	Стандартное отклонение σ , %
Минск	77,6	15	100	9,4
Брест	76	15	100	9
Гродно	78,5	13	100	8,6
Витебск	77,5	13	100	8,8
Гомель	75,2	15	100	9,5
Могилев	79,7	15	100	8

Таблица 3

Продолжительность выдерживания бетона t_c , дни	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
k_c	3	2,03	1,61	1,37	1,2	1,09	1	0,92	0,86	0,81	0,77	0,73	0,7	0,67

Таблица 4

Тип цемента	В/Ц ¹					
	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
Цем. I 42.5R (портландцемент)	Н.о ²	3,1	5,2	6,8	9,8	13,4
Цем. I 42.5R + зола-унос ($k=0,5$)	Н.о ²	0,3	1,9	2,4	6,5	8,3
Цем. I 42.5R + микрокремнезем ($k=2,0$)	3,5	5,5	Н.о ²	Н.о ²	16,5	Н.о ²
Цем. III / В 42.5	Н.о ²	8,3	16,9	26,6	44,3	80

¹ Эквивалентное водоцементное отношение, учитывает золу-унос или микрокремнезем с соответствующим значением k (коэффициент эффективности).
² Н.о. – невозможно определить для этих бетонных смесей обратное эффективное сопротивление карбонизации.

Рекомендуемые значения проектного срока службы t согласно СТБ ISO 2394 приведены в табл. 1.

Коэффициент относительной влажности k_e зависит от уровня влажности, коэффициента диффузии сопротивления карбонизации бетона.

Результаты измерений карбонизации на бетонных и растворных образцах, хранящихся при различных значениях относительной влажности, показали, что при низкой влажности RH до 60% глубина карбонизации возрастает, при увеличении относительной влажности глубина карбонизации уменьшается.

Коэффициент k_e можно рассчитать по следующему уравнению:

$$k_e = \frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100}\right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100}\right)^{f_e}} \cdot g_e \quad (4)$$

где RH_{real} – относительная влажность карбонизированного слоя, %; RH_{ref} – эталонная относительная влажность, является постоянным параметром, равным 65%.

Коэффициенты g_e и f_e определяются методом аппроксимации кривой, полученной по данным эксплуатационных измерений. Рекомендуется использовать значения $g_e = 2,5$; $f_e = 5$.

Значение RH_{real} можно определить исходя из среднегодового значения относительной влажности, определяемого по данным метеорологических станций для конкретной местности.

Значения относительной влажности определяются по данным Гидрометеоцентра. В связи с тем, что значения находятся в пределах $0\% < RH_{real} \leq 100\%$, для описания относительной влажности необходимо применять распределения с верхней и нижней абсолютными границами.

На основе анализа выборки значений среднегодовой влажности атмосферного воздуха RH_{real} за 2006–2010 гг. для всех областных центров Республики Беларусь (табл. 2) сделано заключение, что значения колеблются от 75,2 до 79,7%, стандартное отклонение σ находится в пределах 8–9,5.

Для моделирования случайной величины RH_{real} рекомендуется применять бета-распределение с верхней и нижней абсолютными границами. Установлены верхние и нижние абсолютные границы RH_{real} : $b = 100\%$; $a = 13–15\%$.

Расчет параметра k_c можно выполнить по уравнению либо принять из табл. 3.

Рассмотренные параметры можно объединить:

$$x_c = \sqrt{2 \cdot R_{carb}^{-1} \cdot C_s \cdot \sqrt{t} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\frac{(p_{SR} \cdot T_{0W})^{b_w}}{2}}} \quad (5)$$

где

$$R_{carb}^{-1} = k_{RH} \cdot R_{NAC.O}^{-1} = k_{RH} \cdot (k_1 \cdot k_c \cdot R_{ACC.O}^{-1} + \epsilon_t), \quad (6)$$

где R_{carb} – эффективное сопротивление карбонизации бетона ($m^5/c \cdot kg \cdot CO_2$).

Обратное эффективное сопротивление карбонизации определяется по результатам испытаний ускоренным методом карбонизации (AAC-метод).

После измерения глубины карбонизации по уравнению определяют среднее значение эталонного обратного эффективного сопротивления:

$$R_{ACC.O}^{-1} = \left(\frac{x_c}{\tau}\right)^2, \quad (7)$$

где $R_{ACC.O}^{-1}$ – обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне, (m^2/c)/(kg/m^3); $\tau = 420 (c/kg/m^3)^{0,5}$

Таблица 5

Город	Количество дней с осадками $h_{Nd} \geq 2,5$ мм/год					T_{oW} влажное время, годы
	2006	2007	2008	2009	2010	
Минск	54	76	85	66	72	0,193
Брест	55	55	71	69	57	0,168
Могилев	61	84	74	72	81	0,204
Витебск	63	62	62	66	72	0,178
Гродно	87	84	101	92	94	0,251
Гомель	72	76	102	78	81	0,224

для описанных условий испытания; x_c – измеренная глубина карбонизации в испытании, м.

Если невозможно получить данные обратного сопротивления карбонизации по описанному методу, можно применять данные, определенные по ускоренному методу карбонизации – АСС (табл. 4).

Значения обратного сопротивления карбонизации для представленного ниже примера принимали для железобетонного элемента с В/Ц = 0,5 и расходом портландцемента 400 кг/м³ из табл. 2 с единицей измерения $[10-11(\text{м}^2/\text{с})/(\text{кг}/\text{м}^3)]$. Для использования этих значений в представленной модели единицы измерения преобразованы в $[(\text{м}^2/\text{год})/(\text{кг}/\text{м}^3)]$.

Для моделирования данного параметра в данном примере принято логнормальное распределение со следующими параметрами: среднее значение $\mu = 6,8 \times 10^{-11}(\text{м}^2/\text{с})/(\text{кг}/\text{м}^3)$; стандартное отклонение $\sigma = 0,45 \cdot \mu = 3,07 \cdot 10^{-11}(\text{м}^2/\text{с})/(\text{кг}/\text{м}^3)$.

Коэффициентами k_i и ε_i корректируются отличия испытаний образцов в условиях ускоренной карбонизации (АСС-методом) и в условиях «естественной карбонизации» (метод NAC). Коэффициенты k_i и ε_i введены для преобразования обратного сопротивления $R_{ACC,0}^{-1}$, полученного в условиях ускоренной карбонизации, в обратное сопротивление карбонизации $R_{NAC,0}^{-1}$ в условиях естественной карбонизации согласно методу NAC. Согласно рекомендациям приняты следующие вероятностные модели указанных коэффициентов: ε_i – погрешность при использовании ускоренного метода карбонизации, нормальное распределение с параметрами $\mu(\varepsilon_i) = 315,5(\text{мм}^2/\text{год})/(\text{кг}/\text{м}^3)$ и $\sigma(\varepsilon_i) = 48$; k_i – коэффициент регрессии, логнормальное распределение с параметрами $\mu(k_i) = 1,25$ и $\sigma(k_i) = 0,35$.

Влияние концентрации CO_2 в окружающем воздухе на бетонную конструкцию рассчитывается по уравнению (10). Согласно данным измерительных станций концентрация углекислого газа в атмосфере в 2009 г. составила 399 миллионных доли и прогнозируется увеличение примерно на 2 миллионные доли в год вследствие дополнительных источников загрязнения. Эти данные согласуются с измерениями, проводимыми в Беларуси, например, по данным Гидрометцентра РБ, среднегодовая концентрация диоксида углерода за 2010 г. составила 789 мг/л, что соответствует 400 миллионных долей.

Зная концентрацию углекислого газа на 2010 г. и учитывая дополнительную концентрацию CO_2 вследствие дополнительных источников загрязнения воздуха в городе (26 мг/л), предположив увеличение атмосферной концентрации с каждым годом на 2 миллионные доли, получим следующее уравнение концентрации CO_2 как функцию времени t (учитывая, что плотность углекислого газа 1,97 кг/м³):

$$C_{S,am} = 0,000815 + 0,00000394 \cdot t \text{ (кг } \text{CO}_2/\text{м}^3), \quad (8)$$

где: t – расчетное время, годы.

Для создания вероятностной модели $C_{S,am}$ принимаем среднее значение концентрации углекислого газа в атмосфере $\mu = 0,0000789$ на 2010 г. и стандартное отклонение $\sigma = 0,0001$.

Функция, учитывающая влияние климатических параметров $W(w,t)$ в результате увлажнения бетонной поверхности, описывается уравнением:

$$W = \left(\frac{t_0}{t}\right)^w, \quad (9)$$

где t – время, с; t_0 – эталонное время, с, по ускоренному методу испытаний ($t_0 = 28$ дней); w – показатель погоды.

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

$$w = a_w \cdot T_{oW}^{b_w}, \quad (10)$$

где T_{oW} – влажное время; a_w – параметр регрессии ($m = 0,50$); b_w – параметр регрессии при нормальном распределении ($m = 0,446$; $s = 0,163$).

Величину T_{oW} можно определить по формуле:

$$T_{oW} = z / 365, \quad (11)$$

где z – количество дней с осадками $h_{Nd} \geq 2,5$ мм/год.

Значения регрессионных параметров a_w и b_w по уравнению (10) зависят от метеорологических данных по глубине карбонизации незащищенных конструкций. В этом методе имеется два предельных значения w .

Предел 1. $T_{oW} = 0 \rightarrow w = 0$. Для защищенной конструкции время увлажнения $T_{oW} = 0$. Процесс карбонизации соответствует закону квадратного корня от времени. В результате согласно уравнению (12) показатель $w = 0$.

Предел 2. $T_{oW} = 1 \rightarrow w = 0,5$. Для непрерывного сильного дождя $T_{oW} = 1$, поэтому процесс карбонизации не ожидается. Это приводит к $w = 0,5$, согласно уравнению (8) аннулируется функция времени.

Для вертикальных элементов в расчет вводится вероятность забрызгивания дождем p_{rs} :

$$w = \frac{(p_{rs} \cdot T_{oW})^{b_w}}{2}, \quad (12)$$

где w – показатель погоды; T_{oW} – время увлажнения; b_w – параметр регрессии при нормальном распределении ($m = 0,446$; $s = 0,163$).

Вероятность забрызгивания дождем определяем по уравнению:

$$p_{rs} = \frac{\sum d(w_i \cap r)}{\sum d(r)}, \quad (13)$$

где $\sum d(w_i \cap r)$ – сумма дней в течение одного года с ветром в обоснованном направлении i дней с дождем (вы-

падение осадков $h \geq 2,5$ мм); $\sum d(r)$ — сумма дней в течении одного года с дождем.

Данные для расчета $T_{оив}$ были получены по данным Гидрометеоцентра РБ для шести областных центров Республики Беларусь (табл. 2).

Вероятность бокового дождя p_{SR} можно принять приблизительно: для вертикальных элементов вычисляется из данных метеостанции; для горизонтальных элементов $p_{SR} \leq 1$; для внутренних элементов конструкции $p_{SR} = 0$.

В табл. 5 представлено подробное описание расчета влажного времени для областных центров РБ.

Предложенная полная вероятностная модель карбонизации бетона основывается на известных закономерностях классической теории диффузии, где учитывается связывание углекислого газа, которое зависит от относительной влажности, высушивания и увлажнения бетона, неоднородности бетона.

В данной модели учитываются: время эксплуатации конструкции; обратное эффективное сопротивление карбонизации; погрешность ускоренного метода определения глубины карбонизации; условия ухода за бетоном; относительная влажность окружающего воздуха; концентрация CO_2 в окружающем воздухе; погодные условия (влияние дождевых осадков), способствующие насыщению бетонной поверхности водой и замедляющие процессы карбонизации за счет заполнения пор водой.

Даны рекомендации по составлению вероятностных моделей основных базисных переменных для условий Беларуси (закон распределения, значения его статистических параметров). Для моделирования защитного слоя бетона следует применять нормальный закон распределения. Для моделирования обратного эффектив-

ного сопротивления карбонизации и погрешности его измерения — логнормальный закон.

Относительную влажность воздуха рекомендуется моделировать в виде случайной переменной, подчиняющейся бета-распределению. На основе анализа информации с гидрометеорологических станций для шести областных центров Беларуси получены статистические данные, позволяющие представлять значения относительной влажности воздуха в вероятностной форме: среднегодовые значения, стандартные отклонения, верхние и нижние границы.

На основе данных концентрации углекислого газа в атмосфере в настоящее время (кривая Киллинга), опубликованных данных тенденций возрастания этой величины выполнена оценка значений концентрации углекислого газа с учетом предполагаемого срока службы.

Для вероятностного моделирования погодных условий (влияния дождевых осадков) использована функция, учитывающая влияние климатических параметров в виде случайного процесса, зависящего от относительной продолжительности дождей и вероятности бокового ветра во время дождя. На основе анализа информации с гидрометеорологических станций получены статистические данные среднегодовой продолжительности осадков в различных областных центрах Беларуси. Указанные параметры следует моделировать при помощи логнормального распределения.

Ключевые слова: *глубина и скорость карбонизации бетона, железобетонная конструкция, предельное состояние, долговечность, защитный слой бетона, вероятностная модель, закон распределения, статистические параметры, базисная переменная.*