

УДК 691.328:[620.191.33+620.169.1+539.3]

**ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ КАРБОНИЗАЦИИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Докт. техн. наук, проф. ЛЕОНОВИЧ С. Н.¹⁾, ЧЕРНЯКЕВИЧ О. Ю.²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾Брестский государственный технический колледж

При обследовании существующих конструкций вероятностные методы расчетов открывают обширные возможности для инженеров благодаря гибкости расчетных методик, способных учитывать изменения условий эксплуатации конструкций или предъявляемых к ним требований [1]. Цель – спрогнозировать скорость и глубину карбонизации железобетонных конструкций, подверженных воздействию атмосферных условий, при их эксплуатации в областных центрах Беларуси.

Детерминированный расчет глубины карбонизации бетона, связанный с большим количеством допущений и упрощений, дает возможность достаточно просто устанавливать требования, обеспечивающие долговечность проектируемых конструкций. Однако детерминированные модели карбонизации не позволяют в должной степени учитывать возможные изменения условий эксплуатации либо срок службы проектируемых или обследуемых конструкций. Настоящая статья посвящена вопросам вероятностного моделирования карбонизации бетона. Предполагая, что процесс карбонизации носит стохастический характер, расчетные уравнения скорости и глубины карбонизации должны включать параметры и переменные, также имеющие случайную природу. Для создания вероятностных моделей этих параметров необходимы подробное изучение соответствующих явлений и эффектов, а также анализ актуальных статистических данных.

В статье представлена методика расчета карбонизации бетона без трещин (железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях Республики Беларусь).

Вероятностная модель остаточной толщины защитного слоя. Функция состояния. Уравнение предельного состояния для депассивированной арматуры, т. е. для арматуры, не имеющей защитной пленки, предохраняющей от коррозии:

$$p\{ \} = p_{\text{всп}} \{ a - x_c(t_{SL}) < 0 \} < p_0, \quad (1)$$

где $p\{ \}$ – вероятность депассивации; a – толщина защитного слоя бетона, мм; $x_c(t_{SL})$ – глубина карбонизации, мм, за время t_{SL} , t_{SL} – расчетный срок службы, год; p_0 – допустимая вероятность наступления предельного состояния.

Определить срок службы конструкции t_{SL} 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 1-го закона диффузии Фика из (2) получено уравнение (3). При этом предполагается, что коэффициент диффузии для углекислого газа (CO₂) 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 коррозии карбонизации в бетоне без трещин, в котором толщина защитного слоя бетона сравнивается с глубиной карбонизации $x_c(t_{SL})$ за определенное время t_{SL} :

$$g(a, x_c(t)) = a - x_c(t) = a - \sqrt{2k_e k_c (k_t R_{ACC.0}^{-1} + \varepsilon_t) C_s \sqrt{t} W(t)}, \quad (3)$$

где $x_c(t)$ – глубина карбонизации, мм, за время t ; k_e – коэффициент относительной влажности окружающей среды; k_c – коэффициент твердения; k_t – коэффициент регрессии; $R_{ACC.0}^{-1}$ – обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне, (мм²/год)/(кг/м³); ε_t – 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.

Ниже подробно описаны принятые вероятностные модели каждой из базисных перемен-

ных, содержащихся в (3).

Проектную толщину защитного слоя бетона a назначают из условий защиты арматуры от коррозии, воздействия огня и обеспечения совместной работы арматуры с бетоном. Для статистического моделирования толщины защитного слоя могут применяться как несимметричные, так и симметричные законы распределения, многими авторами допускается применение нормального закона. В данной статье принят подход, при котором толщина защитного слоя бетона a является детерминированной величиной, а отклонения Δa носят случайный характер.

Согласно результатам исследований [2, 3] рекомендуется при вероятностном моделировании отклонений толщины защитного слоя бетона Δa применять следующие параметры: $\mu_a = 0-(+10)$ мм; $\sigma_a = 5-10$ мм.

Для расчета принята следующая вероятностная модель: проектная толщина защитного слоя $a = 20$ мм; отклонения защитного слоя Δa от проектного значения a подчиняются нормальному закону распределения с параметрами: $\mu_a = +6$ мм; $\sigma_a = 10$ мм.

Рекомендуемые значения проектного срока службы t_{SL} согласно СТБ ISO 2394 [4] приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условная классификация расчетных сроков службы

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

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 глубина карбонизации при

низкой влажности RH до 60 % возрастает, при увеличении относительной влажности уменьшается [5, 6].

Коэффициент k_e можно рассчитать по следующему уравнению [7]:

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

Таблица 3

Значения параметра k_c для различных периодов продолжительности выдерживания бетона t_c (твердения) согласно [7]

Период продолжительности выдерживания бетона t_c , дни	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
k_c	3,00	2,03	1,61	1,37	1,20	1,09	1,00	0,92	0,86	0,81	0,77	0,73	0,70	0,67

где RH_{real} – относительная влажность карбонизированного слоя, %; RH_{ref} – рекомендуемая (эталонная) относительная влажность, % (RH_{ref} является постоянным параметром, равным 65 %); g_e коэффициенты и f_e определяются методом аппроксимации кривой, полученной по данным эксплуатационных измерений. В [5, 7] рекомендуется использовать значения $g_e = 2,5$; $f_e = 5,0$.

Величину RH_{real} можно определить исходя из среднегодовых значений относительной влажности, определяемых по данным метеорологических станций для конкретной местности.

В проводимых авторами исследованиях значения относительной влажности в областных центрах определялись по данным Гидрометцентра [8]. 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.

Авторами статьи были проанализированы выборки значений среднегодовой влажности атмосферного воздуха RH_{real} за 2006–2009 гг. для всех областных центров Республики Беларусь. Значения полученных основных статистических параметров приведены в табл. 2.

На параметр k_c оказывает влияние эффективное сопротивление карбонизации, которое

зависит от уплотнения бетона и продолжительности его выдерживания. Значения параметра k_c , полученные в исследовании [7], приведены в табл. 3.

Таблица 2

Статистические параметры среднегодовой относительной влажности RH_{real} для областных центров Беларуси

Город	Значение относительной влажности, %			
	Среднее μ_r	Минимальное a_r	Максимальное b_r	Стандартное отклонение σ_{RH}
Гродно	78,8	41	100	10,0
Могилев	80,4	42	100	8,9
Витебск	78,4	41	100	10,0
Минск	78,0	40	100	10,6
Брест	76,8	36	100	10,2
Гомель	76,5	38	100	10,2

Для моделирования случайной величины RH_{real} применено бета-распределение с верхней и нижней абсолютными границами. На рис. 1 показана плотность распределения относительной влажности для Бреста.

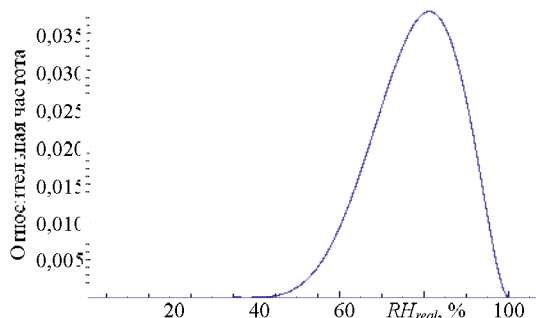


Рис. 1. Плотность распределения RH_{real} для г. Бреста

В данной статье рассматривается пример железобетонного элемента с продолжительностью твердения $t_c = 1$ день, параметр $k_c = 3$.

Значения обратного сопротивления карбонизации в проводимом исследовании принимались для железобетонного элемента с В/Ц = 0,5 и расходом портландцемента 400 кг/м³ (табл. 4). Для использования этих значений в представленной модели (3) единицы измерения $R_{ACC,0}^{-1}$ преобразованы в (м²/год)/(кг/м³).

Таблица 4

Среднее обратное сопротивление карбонизации $R_{ACC,0}^{-1}$, 10^{-11} (м²/с)/(кг/м³), согласно [7]

Тип цемента	В/Ц ¹
-------------	------------------

	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
Цем. I 42.5R (портландцемент)	Н. о. ²	3,1	5,2	6,8	9,8	13,4
Цем. I 42.5R + зола уноса ($k = 0,5$)	Н. о.	0,3	1,9	2,4	6,5	8,3
Цем. I 42.5R + микрокремнезем ($k = 2,0$)	3,5	5,5	Н. о.	Н. о.	16,5	Н. о.
Цем. III/B42.5	Н. о.	8,3	16,9	26,6	44,3	80,0

¹ Эквивалентное водоцементное отношение учитывает золу уноса, или микрокремнезем, с соответствующим значением k (коэффициентом эффективности).

² Н. о. — невозможно определить для этих бетонных смесей обратное эффективное сопротивление карбонизации $R_{ACC,0}^{-1}$.

Для моделирования данного параметра принимали логнормальное распределение со следующими характеристиками: среднее значение: $\mu = 6,8 \cdot 10^{-11}$ (м²/с)/(кг СО₂/м³); стандартное отклонение: $\sigma = 0,45\mu = 3,07 \cdot 10^{-11}$ (м²/с)/(кг СО₂/м³).

Коэффициентами k_t и ϵ_t корректируются отличия испытаний образцов в условиях ускоренной (АСС-метод) и естественной карбонизации (метод НАС). Коэффициенты k_t и ϵ_t введены для преобразования обратного сопротивления $R_{ACC,0}^{-1}$, полученного в условиях ускоренной карбонизации, в $R_{MAC,0}^{-1}$, полученного в условиях естественной карбонизации согласно методу НАС.

По рекомендациям [7] приняты следующие вероятностные модели указанных коэффициентов: ϵ_t — погрешность при использовании ускоренного метода карбонизации — нормальное распределение с параметрами $\mu(\epsilon_t) = 315,5$ (мм²/год)/(кг/м³) и $\sigma(\epsilon_t) = 48,0$; k_t — коэффициент регрессии, логнормальное распределение с параметрами $\mu(k_t) = 1,25$ и $\sigma(k_t) = 0,35$.

Согласно данным измерительных станций в Свалбарде (Северная Норвегия) концентрация углекислого газа в атмосфере в 2009 г. составила 399 миллионных долей. В [9] прогнозировалось, что концентрация будет увеличиваться примерно на две миллионные доли в год (согласно кривой Киллинга). Эти данные согласуются с измерениями, проводимыми в Беларуси (рис. 2). Например, по данным Гидрометцентра, в Березинском заповеднике среднегодовая концентрация диоксида углерода за 2010 г. составила 789 мг/л, что соответствует 400 миллионным долям. Зная концентрацию углекислого газа на 2010 г. и предположив увели-

чение атмосферной концентрации с каждым годом на две миллионные доли, получим следующее уравнение концентрации CO_2 как функцию времени t (учитывая, что плотность углекислого газа $1,97 \text{ кг/м}^3$):

$$C_{S,atm} = 0,000789 + 0,00000394 \cdot t, \text{ кг } CO_2 / \text{м}^3, \quad (5)$$

где t – расчетное время, год.

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

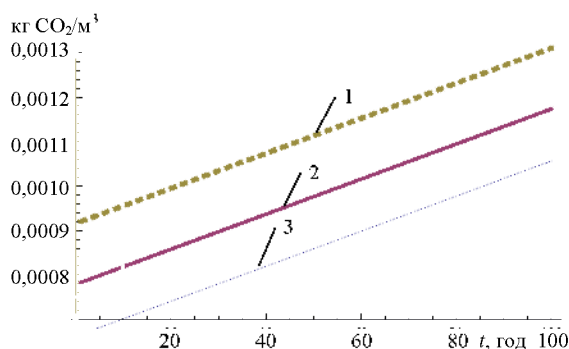


Рис. 2. Концентрация CO_2 в атмосфере с течением времени эксплуатации для условий Беларуси: 1 – значение концентрации с обеспеченностью 90 %; 2 – 50 %; 3 – 10 %

Функция, учитывающая влияние климатических параметров в случае увлажнения бетонной поверхности, описывается уравнением [7]

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} T_{OW})^{0,7}}{2}} = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{0,35}, \quad (6)$$

где T_{OW} – время увлажнения – среднее количество дней с дождем за год; t_0 – эталонный период $t_0 = 0,0767$ (равен 28 дням по АСС-методу); p_{SR} – вероятность ветра во время дождя.

Параметры для расчета T_{OW} были получены по данным Гидрометцентра Беларуси для шести областных республиканских центров и приведены в табл. 5.

Вероятность бокового дождя вычисляется на основе данных о направлении ветра во время дождя по наблюдениям ближайшей метеостанции. Принять величину p_{SR} можно приблизительно: для вертикальных элементов – с учетом данных метеостанции; для горизонтальных элементов $p_{SR} \leq 1$; для внутренних элементов конструкции $p_{SR} = 0$.

Таблица 5

Среднее количество дней с дождем и влажное время для областных центров

Город	Среднее количество дней за год		Время увлажнения T_{OW} , дней в год
	с дождем	с ливнем	
Гродно	9,8	22,3	0,088
Могилев	13,1	17,1	0,083
Витебск	21,9	13,4	0,097
Брест	25,2	16,0	0,113
Минск	21,8	12,7	0,095
Гомель	7,8	20,8	0,078

Для общего случая в проводимых исследованиях принято, что восемь направлений ветра во время дождя равновероятны, т. е. для каждого направления $p_{SR} = 0,125$.

Были рассчитаны значения функции $W(t)$ с течением времени эксплуатации t для всех областных центров республики. На рис. 3 приведен график функции $W(t)$ для г. Бреста, показывающий как изменения среднего значения функции, так и верхнюю доверительную границу.

Вероятностный расчет глубины и скорости карбонизации бетона в конструкциях, эксплуатируемых в Республике Беларусь. Из выражения (3) выводится уравнение для расчета глубины карбонизации в некоторый момент времени t

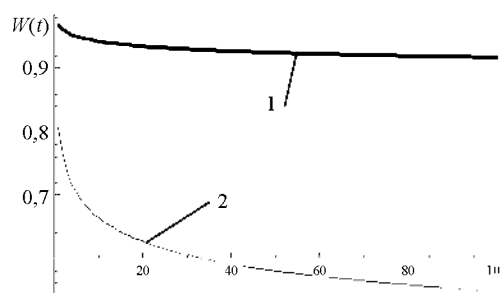
$$x_c(t) = \sqrt{2k_e k_c (k_t R_{ACC,0}^{-1} + \epsilon_t) C_s \sqrt{t} W(t)}. \quad (7)$$

Рис. 3. Значения функции $W(t)$ с течением времени эксплуатации для г. Бреста: 1 – значение концентрации с обеспеченностью 98 %; 2 – 50 %

Путем деления значения глубины карбонизации $x_c(t)$ на время можно получить формулу для расчета скорости карбонизации бетона

$$v_{кар} = \frac{\sqrt{2k_e k_c (k_t R_{ACC,0}^{-1} + \epsilon_t) C_s \sqrt{t} W(t)}}{2}. \quad (8)$$

Выражения (7), (8) представляют полные вероятностные модели глубины карбонизации



и скорости карбонизации бетона в железобетонных элементах.

В табл. 6 представлены разработанные в проведенном исследовании и принятые в расчетах вероятностные модели базисных переменных, входящих в функцию состояния (3) и модели (7), (8). Часть базисных переменных следует моделировать нормальным (N), логнормальным (LN) либо бета-распределением.

Ряд переменных, таких как период эксплуатации, эталонная относительная влажность, время твердения бетона, а также некоторые коэффициенты, принято моделировать в виде детерминированных величин (det). Принятое условие: железобетонная конструкция эксплуатируется в шести областных центрах Беларуси и выполнена из бетона с расходом портландцемента 400 кг/м³ и В/Ц = 0,5.

Таблица 6

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

Параметр	Единица измерения	Тип распределения	Среднее значение (μ), стандартное отклонение (σ), нижняя и верхняя абсолютные границы (a_r, b_r)					
			Минск	Брест	Могилев	Витебск	Гродно	Гомель
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$RH_{real}(k_c)$	%	Бета (с верхним и нижним пределами)	$\mu = 78$ $\sigma = 10,6$ $a_r = 40$ $b_r = 100$	$\mu = 76,8$ $\sigma = 10,2$ $a_r = 36$ $b_r = 100$	$\mu = 80,3$ $\sigma = 8,9$ $a_r = 42$ $b_r = 100$	$\mu = 78,4$ $\sigma = 9,9$ $a_r = 41$ $b_r = 100$	$\mu = 78,8$ $\sigma = 9,9$ $a_r = 41$ $b_r = 100$	$\mu = 76,5$ $\sigma = 10,2$ $a_r = 38$ $b_r = 100$
$RH_{reg}(k_c)$	%	det	65/(-)					
g_e	-	det	2,5					

Окончание табл. 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
f_e	-	det	5,0					
t_e	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	$\mu = 2145 / \sigma = 969$					
ε_t	(мм ² /год)/(кг/м ³)	LN	$\mu = 315,5 / \sigma = 48$					
C_s	кг/м ³	LN	$\mu = 7,86 \cdot 10^{-4} / \sigma = 1 \cdot 10^{-4}$					
b_w	-	LN	$\mu = 0,446 / \sigma = 0,163$					
T_{OW}	дней в год	det	0,095	0,113	0,083	0,097	0,088	0,078
$p_{sr}(W)$	-	det	0,125					
$t_0(W)$	-	det	0,0767 (равно 28 дней)					
a	мм	det	20					
Δa	мм	N	$\mu_a = +6 / \sigma_a = 10$					

Вероятностные расчеты глубины и скорости карбонизации бетона железобетонных элементов на основании моделей (7) и (8) реализованы в программе MATHEMATICA.

Результаты вероятностного расчета глубины и скорости карбонизации бетона железобетонной конструкции для условий эксплуатации в областных центрах Беларуси с течением времени приведены на рис. 4 и 5.

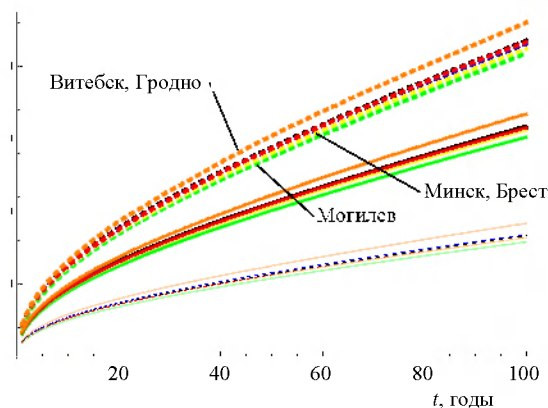


Рис. 4. Рост глубины карбонизации бетона с течением времени эксплуатации в шести областных центрах:

штриховые линии соответствуют значениям с обеспеченностью 98 %; жирные – 90 %, тонкие – 50 %

Вероятностные расчеты карбонизации бетона показали, что одна и та же железобетонная конструкция, произведенная с расходом портландцемента 400 кг/м^3 без добавок и с В/Ц = 0,5, при эксплуатации в Могилеве будет характеризоваться минимальными, а в Гомеле максимальными глубиной и скоростью карбонизации бетона.

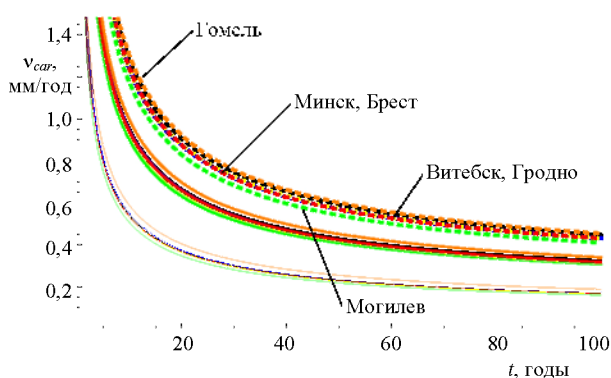


Рис. 5. Изменение скорости карбонизации бетона с течением времени эксплуатации в областных центрах: штриховые линии соответствуют значениям с обеспеченностью 98 %; жирные – 50 %; тонкие – 10 %

Из графиков (рис. 5 и 6) видно, что различия прогнозных значений глубины и скорости карбонизации бетона при прогнозировании на период 100 лет для областных центров Беларуси соответствуют приблизительно 10 %. Также предложенные вероятностные модели позволили определить, что после эксплуатации конструкции на протяжении 100 лет глубина карбонизации бетона в среднем составит 27 мм (обеспеченность 50 %) и не превысит 44 мм с обеспеченностью 98 %.

ВЫВОДЫ

1. Получено уравнение скорости карбонизации бетона, представленное в вероятностной форме, которое позволяет прогнозировать срок службы конструкции как на стадии проектирования новых, так и при оценке технического состояния эксплуатируемых конструкций. При этом необходимо иметь данные о виде цемента, В/Ц, времени ухода за бетоном после укладки, о фактической толщине защитного

слоя арматуры, информацию об условиях эксплуатации конструкции.

2. 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 обратного эффективного сопротивления карбонизации и погрешности его измерения – логнормальный;

- 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 о концентрации углекислого газа в атмосфере в настоящее время (кривая Киллинга), опубликованных данных о тенденциях возрастания этой величины выполнена оценка значений концентрации углекислого газа с учетом предполагаемого срока службы;

- для вероятностного моделирования погодных условий (влияние дождевых осадков) использована функция, учитывающая влияние климатических параметров, относительную продолжительность дождей и вероятность бокового ветра во время дождя. На основе анализа информации с гидрометеорологических станций получены статистические данные о среднегодовой продолжительности (от 9,8 до 25,2 сут. за год в различных областных центрах Беларуси). Указанный параметр следует представлять логнормальным распределением.

3. На основе предложенных вероятностных моделей и функций состояния выполнено моделирование глубины и скорости карбонизации бетона для условий Беларуси с течением времени. Расчет показал, что с учетом атмосферных условий минимальные глубина и скорости карбонизации с течением времени прогнозируются в Могилеве, максимальные – в Гомеле.

ле. При этом различия прогнозных значений глубины и скорости карбонизации бетона для областных центров республики при рассмотрении периода 100 лет незначительны и составляют приблизительно 10 %. Также применение предложенной вероятностной модели позволило спрогнозировать, что после эксплуатации конструкции на открытом воздухе на протяжении 100 лет глубина карбонизации бетона в среднем составит 27 мм и не превысит 44 мм с обеспеченностью 98 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Долговечность** железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев [и др.]. – М.: Стройиздат, 1990. – 247 с.
2. **Марковский, Д. М.** Калибровка значений параметров безопасности железобетонных конструкций с учетом заданных показателей надежности: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Д. М. Марковский, БрГТУ. – Брест, 2009. – 260 с.
3. **JCSS Probabilistic Model Code** // Joint Committee of Structural Safety [Electronic resource]. – 2001. – Mode of access: <http://www.jcss.ethz.ch>. – Date of access: 15.03.2009.
4. **Надежность** строительных конструкций. Общие принципы: СТБ ISO 2394–2007. – Введ. 01.07.2008. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2007. – 69 с.
5. **CEB** – Comite Euro International du Beton. Durable Concrete Structures – Design Guide, Thomas Telford, London, 1992.
6. **CEB** – Comite Euro International du Beton / New Approach to Durability Design – An example for carbonation induced corrosion // Edited by Schiessl, P., Bulletin 238, Comite Euro-International du Beton (CEB), Lausanne, 1997.
7. **Gehlen, C.** Probabilistic Lebensdauerberechnung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion, Thesis, RWTH-Aachen, D82 (Diss. RWTH + Aachen, Heft 510 der Schriftenreihe des DAfStb, 2000.
8. **Архивы** метеорологических наблюдений по метеостанциям Беларуси [Электронный ресурс] / Гидрометцентр Республики Беларусь. – Минск, 2010. – Режим доступа: <http://pogoda.by/zip>. – Дата доступа: 30.11.2010.
9. **Umweltbundesamt**: Daten zur Umwelt – Der Zustand der Umwelt in Deutschland, Ausgabe 1997, 6. Auflage, Berlin, Erich Schmidt.

Поступила 01.11.2011