

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ СЕМИНАР

**ВОПРОСЫ ВНЕДРЕНИЯ НОРМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И
СТАНДАРТОВ ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА
В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

(г. Минск, БНТУ — 22–23.05.2013)

УДК 691.328:620.191.33

**ПРИМЕНЕНИЕ ЕВРОПЕЙСКИХ СТАНДАРТОВ ПРИ
ОЦЕНКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ПРИ КОРРОЗИИ КАРБОНИЗАЦИИ**

ЧЕРНЯКЕВИЧ О.Ю.

Брестский государственный технический колледж
Брест, Беларусь

ЛЕОНОВИЧ С.Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день действуют «Общие принципы надежности строительных конструкций» ISO СТБ 2394. В этом документе изложена концепция надежности, которая предусматривает проектирование, возведение и эксплуатацию железобетонных конструкций. Необходимо отметить, что существует две группы методов расчета: детерминистические и вероятностные методы. В работе представлен вероятностный метод расчета, в котором определены все базисные переменные для условий Республики Беларусь. Данный метод позволяет определить вероятность полной карбонизации защитного слоя бетона по истечению определенного срока эксплуатации конструкции и индекс надежности, который затем сравнивается с нор-

мируемым индексом надежности согласно ISO СТБ 2394. Необходимо отметить, что принципы надежности, принятые в нормах Беларуси, соответствуют общепринятой европейской концепции и базируются на ISO 2394 и Еврокоде 0.

Настоящая работа связана с вероятностным расчетом глубины карбонизации бетона ЖБК и определением индекса надежности ЖБК для соответствующего срока службы.

Цель работы – определить эксплуатационную пригодность железобетонной конструкции.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Принятая за основу математическая модель карбонизации бетона [12, 14] рассматривает влияние факторов окружающей среды, свойств бетона:

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

$$= \sqrt{2 \cdot k_{RH} \cdot k_c \cdot R_{NAC,O}^{-1} \cdot C_s} \cdot \sqrt{t} \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{P_{SR} \cdot T_{OW}^{b_w}}{2}}.$$

где x_c – глубина карбонизации, мм; k_c – коэффициент твердения (уход за бетоном, т.е. сохранение при твердении бетона его влажностного состояния); k_t , ε_t – погрешность, обусловленная использованием ускоренного метода карбонизации, $(\text{мм}^2/\text{год})/(\text{кг}/\text{м}^3)$; $R_{ACC,O}^{-1}$ – обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне, определенной в условиях ускоренной карбонизации, $(\text{мм}^2/\text{год})/(\text{кг}/\text{м}^3)$; $R_{NAC,O}^{-1}$ – обратное сопротивление карбонизации сухого бетона в образцах при естественной карбонизации (НАС-метод), $(\text{мм}^2/\text{год})/(\text{кг}/\text{м}^3)$; C_s – концентрация CO_2 в окружающем воздухе, $\text{кг}/\text{м}^3$; t – время эксплуатации конструкции или расчетный срок службы, год; t_0 – эталонное время, год; T_{OW} – время увлажнения (количество дней с интенсивностью дождя $>2,5$ мм); P_{SR} – вероятность ветра во время дождя.

В работе выполнено сопоставление результатов расчетов по модели, принятой за основу (1), с моделями: Анисимова А.В. [7 стр. 26], Алексеева С.Н. и Розенталя Н.К. [1], Бабицкого В.В. и Голшани М. [18], Кишитани К. [1 стр.123], Рысева О.П. [7, стр.24], Таманна

[2] с экспериментальными данными БелдорНИИ, Дорфа В.А., Sims I. и Roberts V.H., Чиркова В.П., Алексеева С.Н.

Проведен анализ значений глубины и скорости карбонизации бетона, полученных различными авторами экспериментально (таблица 1) и рассчитанных по различным моделям (таблица 2).

Таблица 1. Экспериментальные данные глубины карбонизации (x_c) и скорости карбонизации бетона (v_k) при различных условиях эксплуатации

Время эксплуатации, год	Дорф В.А. и Леонович С.Н. (для жаркого климата) [13]		Sims I., Roberts M.H. (для умеренного климата) [16, 17]		Чирков В.П. [9]		БелдорНИИ	Алексеев С.Н. и Розенталь Н.К. [1, табл. 17]
	x_c , мм	v_k , мм/год δ	x_c , мм	v_k , мм/год	x_c , мм	v_k , мм/год	v_k , мм/год	v_k , мм/год
1	5	5,00						
5	12	2,40						1,6–2,4
10	19	1,90	5–8	0,50–0,80	8–16	0,80–1,60	0,50–1,20	0,97–1,52
20	37	1,85			12–22	0,60–1,10		
30	45	1,50			16–27	0,53–0,90	0,50–0,80	
40					18–31	0,45–0,78		
42								0,16–0,48
50			10–15	0,20–0,35	20–34	0,40–0,62	0,40–1,00	

Полученные значения скорости карбонизации бетона по различным расчетным моделям представлены в таблице 2.

Таблица 2. Скорость карбонизации бетона (v_k) по различным расчетным моделям (при $V/C = 0,44-0,5$; $C = 350 - 400 \text{ кг/м}^3$ для условий Беларуси)

Срок эксплуатации, годы	Расчетная скорость карбонизации бетона, мм/год						
	По формуле Анисимова А.В.	По уравнению Кишигани К.	По уравнению Таманна	По формуле Рысева О.П.	По принятой математической модели	По модели Алексева С.Н., Розенталя Н.К. и Степановой В.Ф.	По модели Бабичко В.В. и Голшани М.
10	1,17	0,66	0,42	1,30	0,63	0,19/1,9	0,67
30	0,63	0,38	0,24	0,75	0,36	0,11/1,1	0,56
50	0,48	0,29	0,19	0,58	0,27	0,09/0,85	0,44

На основе анализа экспериментальных данных (БелдорНИИ, Алексеева С.Н. и Розенталя Н.К., Sims I. и Roberts M. H., Чиркова В.П.) построены графики развития скорости карбонизации бетона в зависимости от длительности эксплуатации конструкции (при различной степени агрессивности окружающей среды) (рисунок 1).

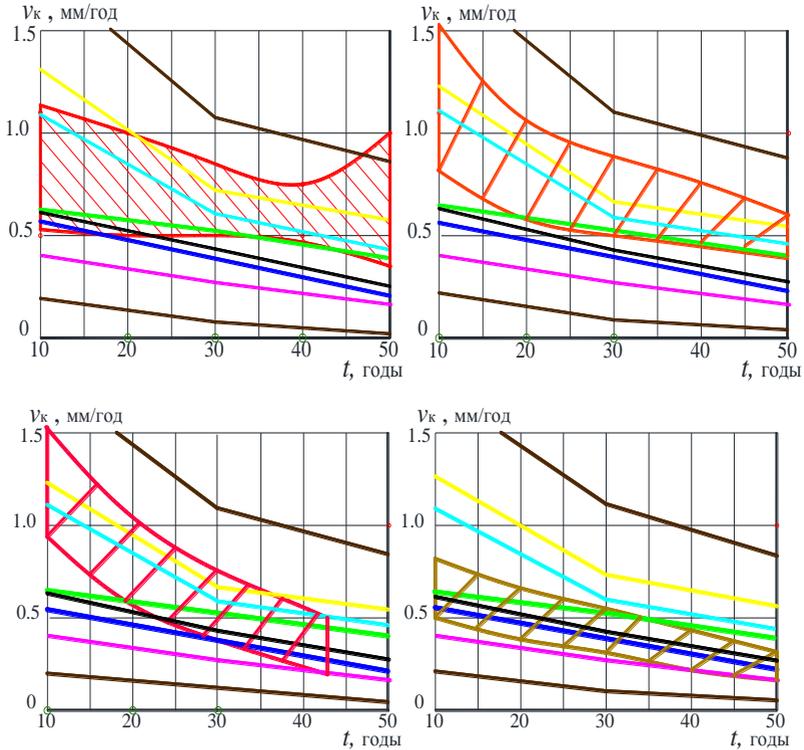
Как видно из графиков, представленных на рисунке 1, математическая модель карбонизации бетона, принятая в качестве базовой при описании процессов карбонизации бетона и учитывающая максимальное количество факторов, может быть принята при составлении функции соостояния в вероятностной постановке.

Ниже представлена методика вероятностного расчета глубины карбонизации бетона железобетонных конструкциях для ХС1 и ХС3 классов по условиям эксплуатации в условиях Республики Беларусь. Данный вероятностный расчет глубины карбонизации дает возможность для обоснования толщины защитного слоя бетона железобетонных конструкций, назначенного в СНБ 5.03.01 – 02 [4].

В основе расчетов лежит уравнение вероятности отказа для депассивированной арматуры (т.е. без защитной пленки, предохраняющей от коррозии):

$$p = p_{\text{ден}} \quad a - x_c(t) < 0 < p_0, \quad (2)$$

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



Экспериментальные данные:



Чирков В.П.

БелдорНИИ

Sims I. и
Roberts M.H.

Алексеев С.Н. и
Розенталя Н.К.

Результаты расчетов по известным моделям:



уравнение Рысева О.П.



модель Алексеева С.Н. и Розенталя Н.К.



формула Анисимова А.В.



модель Бабицкого В.В. и Голшани М.



уравнение Кишитани К.



принятая математическая модель



уравнение Таманна

Рисунок 1. Сравнение скорости карбонизации бетона, полученной расчетными методами с экспериментальными данными: а) БелдорНИИ; б) Чиркова В.П.; в) Алексеев С.Н. и Розенталя Н.К. г) Sims I. и Roberts M. H.

Определить срок службы конструкции t можно с использованием функции предельного состояния:

$$g(a, x_c(t)) = a - x_c(t), \quad (3)$$

где $g(a, x_c(t))$ – функция состояния, определяющая остаточную толщину защитного слоя после эксплуатации конструкции в течение времени t .

В уравнение (1) входит ряд базисных переменных, для которых необходимо установить вероятностные модели. В работе представлены рекомендации по составлению вероятностных моделей основных базисных переменных для условий Республики Беларусь, представленные законами распределения и значениями статистических параметров распределений.

Для учета влияния CO_2 на карбонизацию бетона выполнена оценка содержания углекислого газа в атмосферном воздухе с учетом предполагаемого срока службы железобетонных конструкций. Согласно данным Кривой Килинга, концентрация углекислого газа в атмосфере в 2009 году составила 399 миллионных долей, и ожидается, что она будет увеличиться примерно на 2 миллионные доли в год. Эти данные согласуются с измерениями, проводимыми в Беларуси. По данным Гидрометцентра Республики Беларусь в среднегодовое содержание диоксида углерода за 2010 год составило 789 мг/м^3 (соответствует 400 миллионным долям). Зная концентрацию углекислого газа на 2010 год и учитывая дополнительную концентрацию CO_2 вследствие дополнительных источников загрязнения воздуха в городе (26 мг/м^3), предположив увеличение в атмосфере с каждым годом на две миллионных доли, получим следующее уравнение содержания CO_2 как функцию времени t , (кг/м^3):

$$C_S = C_{S,atm} + C_{S,emi} + 0,00000394 \cdot t = 0,000815 + 0,00000394 \cdot t \quad (4)$$

Выполнено вероятностное моделирование функции $W(t)$, учитывающей влияние климатических параметров в результате увлажнения бетона, в виде случайного процесса, зависящего от относительной продолжительности дождей и вероятности бокового ветра во время дождя [10, 14]:

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{\rho_{SR} T_{ow}^{b_w}}{2}}, \quad (5)$$

где t_0 – эталонное время, согласно ускоренного метода испытаний ($t_0 = 28$ дней равно 0,0767 лет; ρ_{SR} – вероятность ветра во время дождя; T_{ow} – время увлажнения; b_w – экспонент регрессии при нормальном распределении, $m = 0,446$ ($b_w = 0,163$); z – количество дней с осадками $h_{Nd} \geq 2,5$ мм в год;

$$T_{ow} = z/365 \quad (6)$$

В данном исследовании количество дней с осадками более 2,5 мм в год в областных центрах Беларуси и среднее количество дней с дождем для областных центров Беларуси определяли по данным Гидрометцентра Республики Беларусь, приведены в таблице 3.

Таблица 3. Среднее количество дней с дождем для областных центров Республики Беларусь [3]

Город	Количество дней с осадками $h_{Nd} \geq 2,5$ мм в 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

Указанные параметры моделировали при помощи логнормального распределения.

Для моделирования защитного слоя бетона был принят нормальный закон распределения отклонений защитного слоя Δa от проектного значения a ; проектная толщина защитного слоя $a_{XC1} = 30$ мм; $a_{XC3} = 35$ мм; среднее отклонение толщины защитного слоя для XC1 и XC3 классов по условиям эксплуатации $\mu_{\Delta a} = +5$ мм; стандартное отклонение $\sigma_{\Delta aXC1} = 5$ мм и $\sigma_{\Delta aXC3} = 10$ мм.

Коэффициент относительной влажности k_{RH} рассчитываем по

$$\text{уравнению [10, 14]: } k_{RH} = \frac{\left(1 - \left(\frac{RH_{real}}{100}\right)^{f_e}\right)^{g_e}}{\left(1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100}\right)^{f_e}\right)^{g_e}}, \quad (7)$$

где RH_{real} – относительная влажность карбонизированного слоя, равная относительной влажности атмосферного воздуха, %; RH_{ref} – эталонная относительная влажность, 65 %; f_e – коэффициент; g_e – коэффициент. Коэффициенты g_e и f_e определяются методом аппроксимации кривой, полученной по данным эксплуатационных измерений. В данной работе использовались результаты исследований СЕВ [10] и Gehlen С. [14] со значениями $g_e = 2,5$; $f_e = 5,0$.

Согласно СТБ 1544–2005 [5] требования к качеству бетонов должны устанавливаться с учетом классов по условиям эксплуатации конструкций согласно [4], и должны учитываться требования к значению среднегодовой относительной влажности, приведенные в таблице 4.

В данном исследовании значения относительной влажности RH_{real} для ХС1 и ХС3 классов по условиям эксплуатации, находятся в пределах от $30\% < RH_{real,ХС1} \leq 60\%$ и от $60\% < RH_{real,ХС3} \leq 75\%$. Для описания относительной влажности принято распределение с верхней и нижней абсолютными границами (бета-распределение). В работе получены статистические данные, позволяющие представлять значения относительной влажности воздуха в вероятностной форме: среднегодовые значения, стандартные отклонения, верхние и нижние границы.

Таблица 4. Классы по условиям эксплуатации конструкций в зависимости от характеристики окружающей среды [4] и минимальные классы бетона по прочности на сжатие

<i>Класс по условиям эксплуатации</i>	<i>Характеристика окружающей среды, влажностный режим</i>	<i>Примеры для условий окружающей среды</i>	<i>Минимальный класс бетона по прочности на сжатие</i>
<i>XC1</i>	<i>Сухой воздушно-влажностный режим (30% < RH ≤ 60 %) или постоянная эксплуатация в водонасыщенном состоянии</i>	<i>Конструкции, находящиеся внутри помещений с нормальным режимом согласно СНБ 2.04.01; конструкции, постоянно находящиеся в грунте или под водой</i>	<i>C¹⁶/₂₀</i>
<i>XC3</i>	<i>Умеренный воздушно-влажностный режим (60% < RH ≤ 75 %), эксплуатация в условиях эпизодического влагонасыщения</i>	<i>Конструкции, находящиеся внутри помещений с влажным режимом согласно СНБ 2.04.01; конструкции, подвергающиеся атмосферным воздействиям (дождю)</i>	<i>C²⁵/₃₀</i>

Данные обратного сопротивления карбонизации $R_{ACC,0}^{-1}$, можно применять из литературы Gehlen [14], определенные по ускоренному методу карбонизации (таблица 5).

Таблица 5. Среднее обратное сопротивление карбонизации $R_{ACC,0}^{-1}$ [10^{-11} (м²/сек)/(кг/м³)] [12, 12, 15]

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 / В 42.5	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 обратного эффективного сопротивления карбонизации $R_{ACC,0}^{-1}$ и погрешности его измерения принят логнормальный закон распределения со средним значением $\mu_{XC3}=9,8 \cdot 10^{-11}$ и $\mu_{XC1}=13,4 \cdot 10^{-11}$ ($\text{м}^2/\text{сек})/(\text{кг}\text{CO}_2/\text{м}^3)$ и стандартным отклонением $\sigma=(0,45 \cdot \mu)$ ($\text{м}^2/\text{сек})/(\text{кг}\text{CO}_2/\text{м}^3)$ для бетона на портландцементе без добавок при $V/\Pi_{\text{max},XC1} = 0,65$ и $V/\Pi_{\text{max},XC3} = 0,55$. Для использования этих значений в модели (1) единицы измерения $R_{ACC,0}^{-1}$ преобразованы в $(\text{мм}^2/\text{год})/(\text{кг}/\text{м}^3)$. Учет погрешности при использовании ускоренного метода карбонизации при нормальном распределении производится использованием $\varepsilon_t = 315,5(\text{мм}^2/\text{год})/(\text{кг}/\text{м}^3)$ и $(\sigma = 48(\text{мм}^2/\text{год})/(\text{кг}/\text{м}^3))$.

Обратное сопротивление карбонизации сухого бетона $R_{NAC,0}^{-1}$ можно рассчитать и по уравнению (8):

$$R_{NAC,0}^{-1} = \left(\frac{0,75 \cdot m_{CaO} \cdot m_c \cdot DH \cdot \left(\frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \right)}{D_{\text{reff}}} \right)^{-1} = \left(\frac{0,75 \cdot m_{CaO} \cdot m_c \cdot DH \cdot \left(\frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \right)}{\left(\frac{0,0025 \cdot \dot{I}_{\dot{E}}^2}{\sqrt[3]{V_{\dot{E}}^2}} \right) \cdot 1 \cdot 10^{-4}} \right)^{-1}, \quad (8)$$

где a_{CO_2} – способность связывать в бетоне CO_2 , $\text{кг}\text{CO}_2/\text{м}^3$; $D_{\text{reff},0}$ – эффективный коэффициент диффузии для сухого бетона, $\text{м}^2/\text{с}$ (по формуле Бабицким В.В. и Голшани М. [6]); m_{CaO} – содержание CaO в цементе, доли ед.; m_c – масса цемента, $\text{кг}/\text{м}^3$; DH – степень гидратации цемента, доли ед.; M – молярная масса соответствующего вещества, $\text{кг}/\text{моль}$.

Исходные данные, принятые при проведении вероятностного моделирования приведены в таблице 6. В данном вероятностном расчете были приняты наиболее неблагоприятные условия эксплуатации для железобетонной конструкции XC1 и XC3 классов по условиям эксплуатации

Таблица 6. Исходные данные для вероятностного расчета глубины карбонизации железобетонного элемента, эксплуатируемого в Республике Беларусь

Параметры	Единица измерения	Тип распределения	Среднее значение (μ), стандартное отклонение (σ), нижняя и верхняя абсолютные границы (a_r, b_r)	
			Классы по условиям эксплуатации	
			XC1	XC3
$RH_{real}(k_c)$	%	Бета (с верхним и нижним пределом)	$\mu = 46$ $\sigma = 5,0$ $a_r = 30,1$ $b_r = 60$	$\mu = 68$ $\sigma = 3,5$ $a_r = 60,1$ $b_r = 75$
$RH_{ref}(k_c)$	%	det	65 / (-)	
g_e	-	det	2,5	
f_e	-	det	5,0	
t_c	дни	det	14	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	$\mu = 4416 / \sigma = 1987$ (при $V/C_{max} = 0,65$)	$\mu = 3092 / \sigma = 1391$ (при $V/C_{max} = 0,55$)
ε_t	(мм ² /год)/(кг/м ³)	LN	$\mu = 315,5 / \sigma = 48$	
C_s	кг/м ³	LN	$\mu = 9,1 \cdot 10^{-4} / \sigma = 1 \cdot 10^{-4}$	$\mu = 8,15 \cdot 10^{-4} / \sigma = 1 \cdot 10^{-4}$
t_p	годы	det	1 – 50	
b_w	-	LN	$\mu = 0,446 / \sigma = 0,163$	
T_{ow}	-	det	0	0,15
$p_{SR}(W)$	-	det	0	0,125
$t_0(W)$	годы	det	0	0,0767 ($t_0 = 28$ дней)
a	мм	det	30	35
Δa_o	мм	LN	$\mu = +5 / \sigma = 5$	$\mu = +5 / \sigma = 10$

При выполнении вероятностных расчетов глубины карбонизации бетона железобетонных элементов XC1 и XC3 класса по условиям эксплуатации использовалась программа MATHMATICA.

На рисунках 2 – 3 представлены результаты вероятностного расчета глубины карбонизации бетона железобетонной конструкции с использованием исходных данных из таблицы 6.

Рассчитаны вероятность наступления коррозии арматуры и индекс надежности для железобетонной конструкции XC1 и XC3 класса по условиям эксплуатации, представленные в таблице 7.

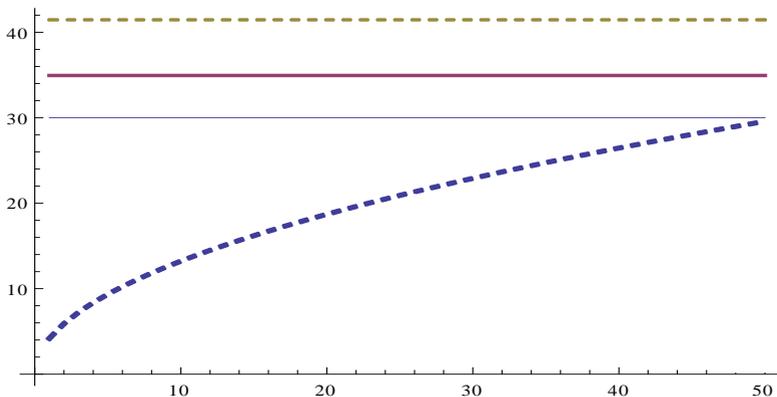


Рисунок 2. Рост глубины карбонизации бетона с течением времени эксплуатации для конструкций XC1 класса по условиям эксплуатации

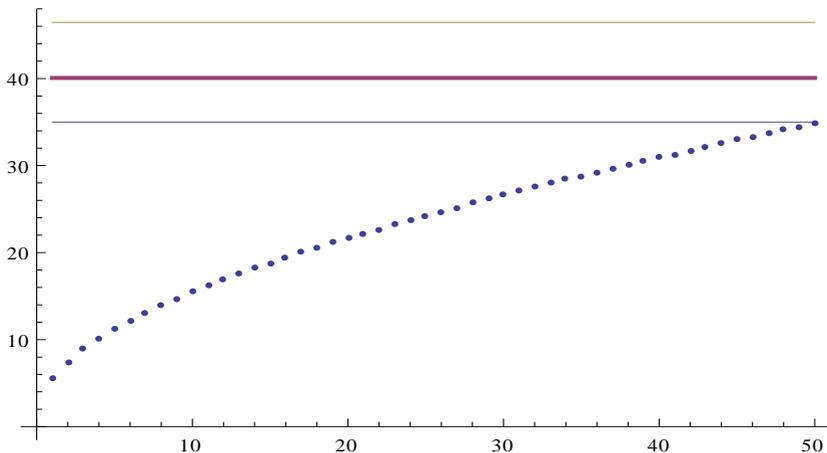


Рисунок 3. Рост глубины карбонизации бетона с течением времени эксплуатации для конструкций XC3 класса по условиям эксплуатации

Получены индексы надежности для 50 лет эксплуатации для железобетонной конструкции XC1 и XC3 класса по условиям эксплуатации $\beta_{xc1} = 1,58$, $\beta_{xc3} = 1,68$, которые больше нормируемого индекса надежности для железобетонных конструкций, пригодных к нормальным условиям эксплуатации $\beta = 1,50$ согласно СТБ ISO 2394 [8].

Таблица 7. Вероятность наступления коррозии арматуры и индекс надежности для железобетонной конструкции на период 50 лет

Срок эксплуатации	Вероятность отказа, p_f	Индекс надежности, β	Вероятность отказа для, p_f	Индекс надежности, β
	Для XC1 класса по условиям эксплуатации		Для XC3 класса по условиям эксплуатации	
10	0	∞	0	∞
20	0,0002	3,54	0,0008	3,20
30	0,0058	2,20	0,0059	2,52
40	0,0263	1,98	0,0220	2,01
50	0,0560	1,58	0,0460	1,68

Вероятностный расчет показал, что минимальные толщины защитного слоя, назначенные в СНБ 5.03.01-02, являются достаточными для защиты арматуры от коррозии в течение 50 лет эксплуатации.

Выводы

1. На основе анализа и верификации моделей карбонизации бетона выявлена наиболее подходящая модель для решения вероятностной задачи определения глубины и скорости карбонизации бетона.
2. Даны рекомендации по составлению вероятностных моделей основных базисных переменных для условий Беларуси (закон распределения, а также значения его статистических параметров).
3. Выполнен вероятностный расчет глубины карбонизации бетона для железобетонных конструкций XC1 и XC3 класса по условиям эксплуатации для наиболее неблагоприятных условий. Получены индексы надежности для 50 лет эксплуатации для железобетонной конструкции XC1 и XC3 класса по условиям эксплуатации $\beta_{xc1} = 1,58$, $\beta_{xc3} = 1,68$, которые нормируемого индекса надежности $\beta = 1,50$ согласно СТБ ISO 2394. Вероятностный расчет показал, что минимальные толщины защитного слоя, назначенные в СНБ 5.03.01-02, являются достаточными для защиты арматуры от коррозии в течение 50 лет эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев, С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С.Н.Алексеев, Н.К.Розенталь. – М.: Стройиздат, 1976. – 205 с.
2. Алексеев, С.Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шиссель – М.: Стройиздат, 1990. – 247с.
3. Архивы метеорологических наблюдений по метеостанциям Беларуси [Электронный ресурс] / Гидрометцентр Республики Беларусь. – Минск, 2010. – Режим доступа : <http://pogoda.by/zip>. – Дата доступа : 30.11.2010.
4. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01–02. – Введ. 01.07.2003. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2003. – 144 с.
5. Бетоны конструкционные тяжелые: СТБ 1544-2005. – Введ. 01.01.2010. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2006. – 25 с.
6. Голшани, М. Прогнозирование глубины карбонизации бетона железобетонных мостовых конструкций / Голшани, М., В.В. Бабицкий, О.М. Вайтович // Строительная наука и техника. – 2011. – №3(36). – С. 45 – 47.
7. Голшани, М. Структура бетона с добавками ингибиторов коррозии стали и его защитные свойства по отношению к стальной арматуре : дис. канд. техн. наук / 05.23.05 / М. Голшани ; БНТУ. – Минск, 2012. – 199 с.
8. Надежность строительных конструкций. Общие принципы : СТБ ISO 2394-2007. – Введ. 01.07.2008. – Минск : Госстандарт Республики Беларусь, 2007. – 69 с.
9. Чиркова, В.П. Оценка срока службы защитного слоя бетона: сборник трудов ХИИТ.– Харьков, 1993. – Вып. 21.
10. СЕВ - Comite Euro International du Beton / New Approach to Durability Design - An example for carbonation induced corrosion// edited by P. Schiessl, Bulletin 238, Comite Euro-International du Beton (CEB). – Lausanne, 1997.
11. DARTS - Durable and Reliable Tunnel Structures: Deterioration Modelling, European Commission, Growth 2000, Contract G1RD-CT-2000-00467, Project GrD1-25633, 2004.

12. Dura Crete: Brite EuRam III Proeject BE95-1347, Report R4-5, Modelling of Degradation, 1998.
13. Dorf, V. Durability of reinforced concrete structures under sea-side tropical climate effects / V. Dorf // Durability Design and Fracture Mechanics of Concrete Structures / B.M. Edit Khroustalev, S.N. Leonovich. – 2003. – P. 26 – 29.
14. 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.
15. LEFECON: Prototype of a Condition Assessment Protocol, Deliverable D3/1, Working Party 3, Project G1RD-CT-2000-00378, 2003.
16. Roberts, M.H. Carbonation of concrete made with dense natural aggregates, BRE, Information Sheet. – 1981.
17. Sims, I. The assessment of concrete for carbonation / I. Sims. – 1994. Concrete 28, 33-38 p.