

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА БЕТОНА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ХС1 КЛАССА ПО УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЦЕЛЕВОГО ИНДЕКСА НАДЕЖНОСТИ

Чернякевич О.Ю., Леонович С.Н.

Применение вероятностных методов к моделированию процесса карбонизации позволяет получать прогнозные оценки глубины карбонизации бетона и, как следствие, назначать минимальную толщину защитного слоя бетона для заданного расчётного срока эксплуатации конструкций.

В статье описан подбор состава бетона под определенные классы по прочности, приведены действующие рекомендации по назначению классов бетона по прочности и требуемой толщине защитного слоя. В Европейских нормах (EN 206:2013) содержатся требования к максимальному значению В/Ц, минимальному содержанию цемента и минимальный класс бетона по прочности в соответствии с классом по условиям эксплуатации ХС1. Поскольку стандарт не содержит обоснований этих требований, нами предпринята попытка получить научное подтверждение этих требований.

В работе использовалось вероятностное моделирование процессов карбонизации бетона для составов, рассчитанных по программе ВТК-коррозия. Выполнен вероятностный расчет глубины карбонизации бетона для железобетонных конструкций с защитным слоем бетона 20-35 мм для наиболее неблагоприятных условий в рамках класса по условиям эксплуатации ХС1.

Ключевые слова: глубина карбонизации бетона, железобетонная конструкция, предельное состояние, долговечность, защитный слой бетона, карбонизация, вероятностная модель, Монте-Карло, закон распределения, статистические параметры, базисная переменная, индекс надёжности.

В основе главных нормативных документов, касающихся проектирования строительных конструкций с заданным уровнем надежности (СНБ 5.03.01 [2], ТКП ЕН 1990 [5], СТБ ISO 2394 [7], СТБ EN 13670-2012 [3], EN 206:2013 (Е) [13]), лежит следующее требование: конструкции и конструктивные элементы следует проектировать, изготавливать таким образом, чтобы их можно было эксплуатировать на протяжении всего расчетного срока службы с минимальными экономическими затратами.

В данной работе применяется *прямой метод Монте-Карло*, поскольку от него берут свое начало все симуляционные методы, которые позволяют решать задачи со значительной нелинейностью функции состояния или невозможностью ее дифференцировать.

К тому же к достоинствам симуляционных методов можно отнести и инвариантность относительно применяемых типов распределений для базисных переменных. Необходимым этапом во всех симуляционных методах является генерирование реализаций стохастических переменных с произвольным распределением вероятностей. В общем случае сначала генерируют случайную величину с равномерным распределением, а затем производят трансформацию полученного массива значений в массив с заданным распределением. Большинство современных компьютерных математических программ позволяют генерировать массивы значений с заранее заданным законом распределения. Результатом статистических испытаний (симуляций), как правило, служит вероятность отказа конструкции – относительное количество отказов. В случае не-

обходимости результатом может быть индекс надежности или гистограмма распределения стохастической границы безопасности, которую затем, например, можно аппроксимировать аналитической функцией распределения вероятностей. Входными параметрами при всех перечисленных задачах являются базисные переменные, каждая из которых представляется либо имеющей вероятностный характер, либо равной детерминированному значению.

Математическая модель карбонизации представленная ниже, объединяет два механизма: диффузию и связывание CO_2 , на которые влияют: относительная влажность, высушивание и увлажнение бетона и др.

Представленная модель в проекте Dura Crete [11], удобна для практического применения инженерами. Модель карбонизации Dura Crete, уточненная Gehlen C. [14], рассматривает влияние факторов окружающей среды

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

где x_c – глубина карбонизации бетона, мм; k_{RH} – коэффициент относительной влажности окружающей среды; k_c – коэффициент, учитывающий период ухода за бетоном (т.е. сохранение при твердении бетона его влажностного состояния, которое исключает раннее высушивание, повышает степень гидратации, а проницаемость бетона для газов с увеличением длительности ухода понижается); k_t – коэффициент, учитывающий уход за бетоном; k_t – коэффициент использования ускоренного метода карбонизации бетона; e_t – погрешность, учитывающая использование 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 эффективное сопротивление карбонизации бетона в образцах естественной карбонизации, $(\text{мм}^2/\text{ГОД})/(\text{кг}/\text{м}^3)$; C_s – концентрация CO_2 в окружающем воздухе, $\text{кг}/\text{м}^3$; $t_{сл}$ – время эксплуатации конструкции или расчетный срок службы, год; t_0 – эталонное время, год; p_{SR} – вероятность ветра во время дождя; T_{OW} – время увлажнения; b_w – экспонент регрессии при нормальном распределении, $m = 0,446$ ($b_w = 0,163$).

Уравнение (2) лежит в основе *полного вероятностного расчетного метода* для карбонизации в бетоне без трещин, в котором толщина защитного слоя бетона сравнивается с глубиной карбонизации $x_c(t_p)$ за определенное время t_p

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

где $g(a, x_c(t_p))$ – *функция предельного состояния*, определяющая остаточную толщину защитного слоя после эксплуатации конструкции в течение времени t_p ; a – толщина защитного слоя бетона, мм; $x_c(t_p)$ – глубина карбонизации бетона за время t_p , мм.

Толщина защитного слоя бетона a выбирается на стадии проектирования в зависимости от условий эксплуатации конструкции. Защитный слой бетона не постоянное значение, а случайная величина.

В таблице 1 приведены предельные отклонения защитного слоя бетона согласно ГОСТ 13015.0 [6]. Эти данные позволяют провести теоретический анализ некоторых параметров распределения случайных отклонений σ .

Что касается параметра μ , то можно заметить, что рекомендации JCSS [15] ($\mu = -10 \dots +10$ мм) соответствуют скорее требованиям Eurocode 2 [12]. Белорусские нормы соответствуют диапазону $\mu = -5 \dots +15$ мм.

Фактические исследования указывают на явный положительный тренд отклонений толщины защитного слоя бетона со средним значением около $\mu_y = +10$ мм для нижней арматуры. Для верхней арматуры мало данных, однако они указывают на еще большие значения средних отклонений.

Таблица 1 – Предельные отклонения защитного слоя бетона согласно нормам [6, 10, 12].

Номинальный размер	Допуск Δ (мм) по ГОСТ 13015.0 [6] при размере сечения, мм				Δa_{dev} (мм) по EN 1992 [12]	Δa_{dev} (мм) по DIN 1045 [10]
	< 100	100...200	200...300	>300		
$a = 10...14$ мм	+4, -0	+5, -0	+6, -0	–	±10	±10 внутренние элементы ±15 наружные элементы
$a = 4...19$ мм	+4, -3	+8, -3	+10, -3	+15, -5		
$a > 19$ мм	±5	+8, -5	+10, -5	+15, -5		

Коэффициент относительной влажности k_{RH} можно рассчитать по следующему уравнению [9, 14, 15]

$$k_{RH} = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e}, \quad (3)$$

где RH_{real} – относительная влажность воздуха по данным гидрометеостанций; RH_{ref} – эталонная влажность воздуха, 65%.

Коэффициенты g_e и f_e определяются методом аппроксимации кривой, полученной по данным эксплуатационных измерений. В работах [8, 9, 14, 16] рекомендуется использовать значения $g_e = 2,5$; $f_e = 5,0$.

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

В данном исследовании значения относительной влажности принимали для железобетонных конструкций ХС1 класса по условиям эксплуатации.

На параметр k_c оказывает влияние продолжительность ухода за бетоном.

На основе Байесовской линейной регрессии отношение продолжительности ухода за бетоном, приведены в СТБ EN 13670-2012 в таблицах F.1– F.3 [13]) и коэффициента твердения k_c были определены в [9, 16]

$$k_c = \left(\frac{t_c}{a_c} \right)^{b_c}, \quad (4)$$

где t_c – продолжительность ухода за бетоном, дни; a_c – параметр регрессии, $a_c = 7^{bc}$ (дни), [8, 9]; b_c – показатель регрессии при нормальном распределении ($\mu = -0,567$; $\sigma = 0,024$) (-), [14, 16].

Расчет параметра k_c можно выполнить по уравнению (4) либо принять из таблицы 2.

Таблица 2 – Значения параметра k_c для различных периодов продолжительности ухода за бетоном t_c согласно [9, 14, 16]

Продолжительность ухода за бетоном 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

В данной работе рассматривается пример железобетонного элемента с продолжительностью ухода за бетоном $t_c = 1$ день, параметр $k_c = 3,0$.

Сопротивление карбонизации зависит от эффективного коэффициента диффузии $D_{reff,0}$ и способности связывания a_{CO_2} в бетоне

$$R_{NAC,0} = \left(\frac{a_{CO_2}}{D_{reff,0}} \right), \quad (5)$$

где a_{CO_2} – коэффициент, учитывающий способность CO_2 закрепляться в бетоне, $кгCO_2/м^3$;
 $D_{reff,0}$ – эффективный коэффициент диффузии для бетона, $м^2/с$,

$$a_{CO_2} = 0,75 \cdot m_{CaO} \cdot m_c \cdot DH \cdot \left(\frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \right), \quad (6)$$

где m_{CaO} – содержание CaO в цементе, доли ед.; m_c – содержание цемента в бетоне, $кг/м^3$; DH – степень гидратации цемента, доли ед.; M – молярная масса соответствующего вещества, $кг/моль$.

Рассчитать обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне с использованием уравнения (5) и (6) и с учетом уравнения (7) для расчета эффективного коэффициента диффузии углекислого газа ($см^2/с$) в капиллярно-пористой среде бетона, полученного Бабицким В.В. и Голшани М. [4]

$$D_{reff,0} = \frac{0,0025 \cdot \Pi_K^2}{\sqrt[3]{V_K^2}}, \quad (7)$$

где V_K – объем цементного камня в бетоне, доли ед.; Π_K – капиллярная пористость бетона, доли ед.

Тогда выражение для расчета эффективного сопротивления карбонизации $R_{NAC,0}$, бетона [$(м^2/с)/(кг/м^3)$] (с использованием НАС-метода естественной карбонизации) (5) может быть записано следующим образом:

$$R_{NAC,0} = \left(\frac{0,75 \cdot m_{CaO} \cdot m_c \cdot DH \cdot \left(\frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \right)}{\frac{0,0025 \cdot \Pi_K^2 \cdot 10^{-4}}{\sqrt[3]{V_K^2}}} \right) = \left(\frac{0,75 \cdot m_{CaO} \cdot m_c \cdot DH \cdot \left(\frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \right)}{\frac{0,0025 \cdot \Pi_K^2 \cdot 10^{-4}}{\sqrt[3]{\left(m_c \cdot \left(\frac{1}{r_c} + \frac{B}{r_b} \right) \right)^2}}} \right), \quad (8)$$

где m_{CaO} – содержание CaO в цементе, доли ед.; m_c – содержание цемента в составе бетона, $кг/м^3$; DH – степень гидратации цемента, доли ед.; M – молярная масса соответствующего вещества, $кг/моль$; Π_K – капиллярная пористость бетона, доли ед.; V_K – объем цементного камня в бетоне, доли ед.

Уравнение для расчета капиллярной пористости бетона Π_K [1]

$$\Pi_K = \frac{m_c \left(0,98 \cdot \left(\frac{B}{\Pi} \right) - 0,0094 - 0,369 \cdot DH \right)}{1000}, \quad (9)$$

где m_c – содержание цемента в составе бетона, $кг/м^3$; B/Π – водоцементное отношение; DH – степень гидратации цемента, доли ед.

Согласно EN 206:2013 (E) [13] требования к качеству бетонов должны устанавливаться с учетом классов по условиям эксплуатации конструкций, и должны учитываться требования к предельным значениям параметров бетонной смеси, приведенные в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Класс среды по условиям эксплуатации конструкций ХС1 в зависимости от характеристики окружающей среды [13]

Класс среды по условиям эксплуатации	Характеристика окружающей среды	Примеры для классов среды по условиям эксплуатации
ХС1	Сухая или постоянно влажная	Элементы конструкций внутри помещений с низкой влажностью воздуха; Элементы конструкций постоянно находящиеся в воде

Таблица 4 – Предельные значения параметров бетонной смеси согласно EN 206:2013 [13]

Параметры бетонной смеси	Предельные значения параметров бетонной смеси в зависимости от классов по условиям эксплуатации
	Карбонизация
Максимальное В/Ц	ХС1 0,65
Минимальный класс по прочности, С	$\frac{20}{25}$
Минимальный расход цемента, кг/м ³	260

В работе запроектированы составы бетона под определенные классы бетона по прочности (С16/20 – С 25/37) с использованием программы ВТК-коррозия. Исходные данные: портландцемент марки 400 и марки 500 (Цементный завод – ОАО "Красносельскстройматериалы"), удельная поверхность – 320 м²/кг, плотность цемента – 3070 кг/м³, нормальная густота – 26 %, содержание С₃S = 56 %; содержание СаО в цементе – 0,62 доли ед.; мелкий заполнитель – песок естественный, модуль крупности – 2,5; крупный заполнитель – гранитный щебень фракции 5–20.

Определено требуемое обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне $R_{NAC,0}^{-1}$ (по уравнению 8) для железобетонных конструкций ХС1 класса по условиям эксплуатации для различных толщин защитного слоя (20, 25, 30, 35 мм) на период 50 лет. С использованием функции состояния (2) в среде МАТНЕМАТІСА выполнено вероятностное моделирование, с учетом данных представленных в таблице 5 и получено требуемое обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне ($R_{NAC,0}^{-1}$) на период эксплуатации 50 лет при концентрации углекислого газа 0,00197 кг/м³ (1000 ppm), соответствующего нормируемому индексу надежности 1.5.

В таблице 6 представлены рекомендуемые составы бетона без добавок и в таблице 8 рекомендуемые составы бетонов с добавкой (добавка: пластификатор С-3) соответствующие толщинам защитного слоя 20, 25, 30, 35 мм, для железобетонных конструкций ХС1 класса по условиям эксплуатации на период 50 лет эксплуатации при концентрации углекислого газа 0,00197 кг/м³.

Запроектированы составы бетона с добавкой пластификатором С-3, под определенные классы бетона по прочности на сжатие (С16/20 – С 25/30) с использованием программы ВТК-коррозия. Исходные данные: портландцемент марки 400 и 500 (Цементный завод – ОАО "Красносельскстройматериалы"), удельная поверхность – 320 м²/кг, плотность цемента – 3070 кг/м³, нормальная густота – 26 %, содержание С₃S = 56 %; мелкий заполнитель – песок естественный, модуль крупности – 2,5; крупный заполнитель – гранитный щебень фракции 5–20, добавка – пластификатор С-3 – 0,6 % от массы цемента.

В таблице 4 представлены предельные значения параметров бетонной смеси, где максимальное водоцементное отношение для ХС1 класса по эксплуатации составляет 0,65, для подобранных составов бетона получены В/Ц в

пределах от 0,371 до 0,55. В EN 206:2013 [64] прописаны требования по бетону для XC1 класса по эксплуатации – это минимальный расход цемента, который составляет 260 кг/м³, в подобранных составах бетона расход цемента колеблется от 295 до 516 кг/м³. Согласно EN 206:2013 [64] минимальный класс по прочности на сжатие для XC1 класса по условиям эксплуатации составляет C20/25. Для подобранных составов бетона получены классы по прочности на сжатие от C18/22,5 до C30/37, в зависимости от толщины защитного слоя.

Таблица 5 – Требуемое обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне $R_{NAC,0}^{-1}$, при соблюдении нормируемого индекса надежности ($\beta=1,5$) для железобетонных конструкций XC1 класса по условиям эксплуатации на период 50 лет, при концентрации углекислого газа 0,00197 кг/м³

Обозначение	Определение базисной переменной	Значения параметров для XC1 класса по условиям эксплуатации			
		255	400	580	777
$R_{NAC,0}^{-1}$	требуемое обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне, (м ² /сек)/(кгСО ₂ /м ³)	255	400	580	777
t_c	время ухода за бетоном, день	1			
RH_{real}	относительная влажность воздуха окружающей среды, %	46			
a_{RH}, b_{RH}	min и max влажность воздуха в помещении, %	30, 60			
C_s	содержание СО ₂ в помещении, кг/м ³	0,00197			
t	время эксплуатации, годы	50			
a	толщина защитного слоя бетона, мм	20	25	30	35
β	индекс надежности	1,51	1,52	1,51	1,51

Таблица 6 – Составы бетона без добавок и обратное эффективное сопротивление карбонизации бетона для железобетонных конструкций XC1 класса по условиям эксплуатации на период 50 лет при концентрации углекислого газа 0,00197 кг/м³

Обозначение	Определение базисной переменной	Значения параметров для XC1 класса по условиям эксплуатации			
		20	25	30	35
a	толщина защитного слоя бетона, мм	20	25	30	35
$R_{NAC,0}^{-1}$	требуемое обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне, (м ² /сек)/(кгСО ₂ /м ³)	255	400	580	775
$R_{NAC,0}^{-1}$	полученное обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне, (м ² /сек)/(кгСО ₂ /м ³)	253	395	561	750
D_{eff}	эффективный коэффициент диффузии для бетона, м ² /с	$1,19 \cdot 10^{-9}$	$1,79 \cdot 10^{-9}$	$2,09 \cdot 10^{-9}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$
C_s	содержание СО ₂ в помещении, кг/м ³	0,00197			
C	подобранный класс бетона	C30/37	C22/27,5	C20/25	C18/22,5
B/C	водоцементное отношение	0,4	0,42	0,45	0,5
m_c	марка цемента М400 и масса цемента, кг	386	397	347	295
β	индекс надежности	1,56	1,56	1,64	1,62
R_{28}	расчетная ожидаемая прочность бетона, МПа	47,5	35,1	32,1	28,9
	требуемая минимальная прочность бетона на сжатие для класса бетона C20/25	32,2			

Рассчитываем составы бетона под определенные классы бетона по прочности (С16/20 – С30/37) и выходим на рекомендации по классу бетона по прочности и требуемую толщину защитного слоя. В Европейских нормах содержатся требования, которые определяют максимальное В/Ц, минимальное содержание цемента и минимальный класс бетона по прочности, который должен соответствовать ХС1 классу по условиям эксплуатации, однако обоснования этим требованиям отсутствуют. В связи с этим предпринята попытка получить научное обоснование требований, содержащихся в Европейских нормах исходя из класса по условиям эксплуатации железобетонных конструкций. Для решения данной задачи использовалось вероятностное моделирование глубины карбонизации бетона с учетом рассчитанного состава бетона по программе ВТК-коррозия.

Таблица 7 – Составы бетона с добавкой (Пластификатор С-3) и обратное эффективное сопротивление карбонизации бетона для железобетонных конструкций ХС1 класса по условиям эксплуатации на период 50 лет при концентрации углекислого газа 0,00197 кг/м³

Обозначение	Определение базисной переменной	Значения параметров для ХС1 класса по условиям эксплуатации			
		20	25	30	35
a	толщина защитного слоя бетона, мм	20	25	30	35
$R_{NAC,0}^{-1}$	требуемое обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне, (м ² /сек)/(кгСО ₂ /м ³)	255	400	580	775
$R_{NAC,0}^{-1}$	полученное обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне, (м ² /сек)/(кгСО ₂ /м ³)	257	407	580	782
D_{eff}	эффективный коэффициент диффузии для бетона, м ² /с	$9,71 \cdot 10^{-10}$	$1,21 \cdot 10^{-9}$	$2,01 \cdot 10^{-9}$	$2,52 \cdot 10^{-9}$
C	подобранный класс бетона	C20/25	C20/25	C18/22,5	C18/22,5
B/C	водоцементное отношение	0,36	0,39	0,41	0,47
m_c	марка цемента М400 и масса цемента, кг	516	486	466	332
β	индекс надежности	1,52	1,5	1,51	1,53
R_{28}	расчетная ожидаемая прочность для полученного класса бетона, МПа	42,4	38,9	36,5	30,9
	требуемая прочность бетона на сжатие для класса бетона C20/25	32,2			

Выше представлено подтверждение предельных значений В/Ц и расхода цемента на 1 м³ бетона согласно EN 206:2013 [64], составы бетонов не превышают максимальное В/Ц=0,65 и минимальный расход цемента на 1 м³ бетона для минимального класса бетона по прочности на сжатие С20/25 исходя из требуемой толщины защитного слоя бетона (таблица 5 – 7). Полученные составы бетона удовлетворяют нормируемому индексу надежности 1,50 для требуемых толщин защитного слоя бетона.

При подборе составов бетона для ХС1 класса по условиям эксплуатации получены составы бетона соответствующих классам от С18/22,5 до С30/37 и расчетная прочность от 28,9 до 47,5 МПа в зависимости от требуемой толщины защитного слоя бетона (20, 25, 30, 35 мм) и условий эксплуатации (т.е. максимальной концентрации СО₂ в помещении 0,00197 кг/м³). Чем меньше толщина защитного слоя бетона, тем прочность бетона должна быть выше и меньше В/Ц для того, чтобы обеспечить требования проницаемости.

ВЫВОДЫ. 1. Данные, полученные по представленной вероятностной модели карбонизации бетона, можно использовать на практике, чтобы оценить длительность эксплуатации железобетонной конструкции для ХС1 класса по условиям эксплуатации.

2. Рассчитаны обратные эффективные сопротивления карбонизации бетона для различных составов бетона. Получены требуемые обратные эффективные сопротивления карбонизации бетона ($R_{MAC,0}^{-1}$) для ХС1 класса по условиям эксплуатации для толщин защитного слоя от 20 мм до 35 мм удовлетворяющие нормируемому индексу надежности 1,5 для 50 лет эксплуатации, что позволяет запроектировать составы бетона под определенные классы бетона по прочности.

3. Разработан метод расчета глубины карбонизации бетона на основе вероятностных методов оценки надежности и представлен алгоритм расчета глубины карбонизации бетона железобетонных конструкций ХС1 класса по условиям эксплуатации, который показал, что необходимо назначать класс бетона по прочности на сжатие в зависимости от требуемой толщины защитного слоя бет она, условий и сроков эксплуатации.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бабицкий, В.В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона : дис. д-ра техн. наук : 05.23.05 / В.В. Бабицкий ; БНТУ. – Минск, 2005. – 540 с.
2. Бетонные и железобетонные конструкции : СНБ 5.03.01–02. – Введ. 01.07.2003. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2003. – 144 с.
3. Возведение бетонных и железобетонных конструкций : СТБ EN 13670-2012. – Введ. 01.01.2013. – Минск : Госстандарт Республики Беларусь, 2013. – 54 с.
4. 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.
5. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций: ТКП ЕН 1990-2011. – Введ. 01.07.2012. – Минск : Технический кодекс Республики Беларусь, 2011. – 74 с.
6. Конструкции и изделия бетонные и железобетонные сборные. Общие технические требования : ГОСТ 13015.0-83. – Введ. 01.01.1984. – Москва : Госстандарт СССР: ЦНИИ-промзданий, 1983. – 14 с.
7. Надежность строительных конструкций. Общие принципы : СТБ ISO 2394-2007. – Введ. 01.07.2008. – Минск : Госстандарт Республики Беларусь, 2007. – 69 с.
8. 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.
9. DARTS - Durable and Reliable Tunnel Structures: Deterioration Modelling, European Commission, Growths 2000, Contract G1RD-CT-2000-00467, Project GrD1-25633, 2004.
10. Deutsche Norm. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1 : Bemessung und Konstruktion: DIN 1045-1:2001. – Berlin : Deutsches Institut für Normung, 2001. – 183 s.
11. Dura Crete : Brite EuRam III Proeject BE95-1347, Report R 4–5, Modelling of Degradation, 1998.
12. Eurocode 2. Design of concrete structures – Part 1-1 : General rules and rules for buildings : EN 1992-1-1:2004 (E). – Brussels : European Committee for Standardization, 2004. – 225 p.
13. European Standard. Concrete – Specification, performance, production and conformity : EN 206:2013 (E). – Brussels : European Committee for Standardization, 2013. – 93 p.
14. Gehlen, C. : Probabilistic Lebensdauerberechnung von Stahlbeton-bauwerken – Zuerlassigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion, Thesis, RWTH-Aachen, D82 (Diss. RWTH + Aachen, Heft 510 der Schriftenreihe des DAfStb, 2000.
15. 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.
16. LIFECON : Prototype of a Condition Assessment Protocol, Deliverable D3/1, Working Party 3, Project G1RD-CT-2000-00378, 2003. – 169 p.