

Расчет состава бетона железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях класса XC1, в зависимости от толщины защитного слоя

О. Ю. Чернякевич¹⁾, докт. техн. наук, проф. С. Н. Леонович²⁾

¹⁾КУП «Брестжилстрой» (Брест, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016

Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Коррозия арматуры – важнейшая проблема долговечности железобетонных конструкций, как правило, обусловливается 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 карбонизации бетона и, как следствие, назначать минимальную толщину защитного слоя бетона для заданного расчетного срока эксплуатации конструкций. В статье описаны правила подбора состава бетона под определенные классы по прочности, рассмотрены действующие рекомендации по назначению классов бетона по прочности и требуемой толщине защитного слоя. В европейских нормах EN 206:2013 приводятся требования к максимальному значению водоцементного отношения, минимальному содержанию цемента и минимальному классу бетона по прочности в соответствии с классом XC1 по условиям эксплуатации. Поскольку данный стандарт не содержит обоснований этих требований, авторами предпринята попытка получить их научное подтверждение. При решении такой задачи использовали 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 XC1 по условиям эксплуатации.

Ключевые слова: карбонизация бетона, железобетонная конструкция, предельное состояние, долговечность, защитный слой бетона, индекс надежности

Для цитирования: Чернякевич, О. Ю. Расчет состава бетона железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях класса XC1, в зависимости от толщины защитного слоя / О. Ю. Чернякевич, С. Н. Леонович // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 6. С. 460–468

Calculation of Composition for Concrete of Reinforced Structures Being Operated under Conditions of XC1 Class According to Thickness of Protective Layer

O. Yu. Cherniakevich¹⁾, S. N. Leonovich²⁾

¹⁾CIE (Communal Unitary Enterprise) “Brestzhilstroy” (Brest, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Reinforcement corrosion is considered as the most important problem in respect of reinforced concrete structures durability and it is usually caused by carbonization of concrete that surrounds it. Due to differences in structure manufacturing and operational conditions calculation of protective concrete layer is taken as a predictive one at the design stage. Application of probabilistic methods for simulation of the carbonization process makes it possible to obtain prediction estimates for concrete carbonation depth and consequently it allows to prescribe a minimum thickness of the protective concrete layer for a predetermined expected useful life of structures. The paper describes procedures on concrete proportioning for specific strength classes and it considers standard recommendations on application of concrete grades according to strength and the required thickness of the protective layer. European Standards EN 206:2013 contain requirements to maximum value

Адрес для переписки

Чернякевич Оксана Юозефовна
КУП «Брестжилстрой»
ул. Гоздецкого, 11,
224028, г. Брест, Республика Беларусь
Тел.: +375 162 53-07-90
cherniakevich@tut.by

Address for correspondence

Cherniakevich Oksana Yu.
CIE (Communal Unitary Enterprise) “Brestzhilstroy”
11 Gozdetsky str.,
224028, Brest, Republic of Belarus
Tel.: +375 162 53-07-90
cherniakevich@tut.by

of water/cement ratio, minimum cement content and minimum concrete grade according to strength in compliance with class XC1 while following operational conditions. As the given standard does not comprise any justifications for the requirements an attempt has been made to obtain their scientific support. Probabilistic simulation of concrete carbonation processes for mixes has been used for solution of the problem. The mixes have been calculated with the help of VTK-corrosion software. Probabilistic calculation of the concrete carbonation depth for reinforced concrete structures with 20–35 mm-protective concrete layer has been made in the paper. The calculation has been accomplished for the most adverse conditions within the framework of class XC1 while following operational conditions.

Keywords: carbonation of concrete, reinforced concrete structure, limit state, durability, protective concrete layer, reliability index

For citation: Cherniakov O. Yu., Leonovich S. N. (2016) Calculation of Composition for Concrete of Reinforced Structures Being Operated under Conditions of XC1 Class According to Thickness of Protective Layer. *Science & Technique*. 15 (6), 460–468 (in Russian)

В основе главных нормативных документов, касающихся проектирования строительных конструкций с заданным уровнем надежности (СНБ 5.03.01–2002 [1], ТКП ЕН 1990–2011 [2], СТБ ISO 2394–2007 [3], СТБ EN 13670–2012 [4], EN 206:2013 (E) [5]), лежит следующее требование: конструкции и конструктивные элементы следует проектировать и изготавливать таким образом, чтобы их можно было эксплуатировать на протяжении всего расчетного срока службы с минимальными экономическими затратами.

В данной статье 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 необходимости результатом может быть индекс надежности или гистограмма распределения стохастической границы безопас-

ности, 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 далее в статье, объединяет два механизма: диффузию и связывание CO_2 , на которые влияют относительная влажность, высушивание и увлажнение бетона и др. Приведенная в проекте Dura Crete [6] модель удобна для практического применения инженерами. Модель карбонизации Dura Crete, уточненная С. Gehlen [7], рассматривает влияние факторов окружающей среды

$$x_c = \sqrt{2k_{RH}k_c(k_t R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t)C_s} \sqrt{t} \left(\frac{t_0}{t_{cl}} \right)^{\frac{(p_{SR}T_{ow})^{b_w}}{2}} =$$

$$= \sqrt{2k_{RH}k_c(R_{NAC,0}^{-1})C_s} \sqrt{t} \left(\frac{t_0}{t_{cl}} \right)^{\frac{(p_{SR}T_{ow})^{b_w}}{2}}, \quad (1)$$

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 – то же использования ускоренного метода карбонизации бетона; ε_t – погрешность, учитывающая использование ускоренного метода карбонизации, $\text{мм}^2/\text{год}/(\text{кг}/\text{м}^3)$; $R_{ACC,0}^{-1}$ – обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне, определенной в услови-

ях ускоренной карбонизации, мм²/год/(кг/м³); $R_{NAC,0}^{-1}$ – обратное эффективное сопротивление карбонизации бетона в образцах естественной карбонизации, мм²/год/(кг/м³); C_s – концентрация CO₂ в окружающем воздухе, кг CO₂/м³; t_{cl} – время эксплуатации конструкции или расчетный срок службы, год; t_0 – эталонное время, год; p_{SR} – вероятность ветра во время дождя; T_{0w} – время увлажнения; b_w – экспонент регрессии при нормальном распределении, при $m = 0,446$ $b_w = 0,163$.

Полный вероятностный расчетный метод карбонизации в бетоне без трещин, в котором толщина защитного слоя бетона сравнивается с глубиной карбонизации $x_c(t_p)$ за определенное время t_p , можно представить следующей формулой:

$$g(a, x_c(t_p)) = a - x_c(t_p) = a - \sqrt{2k_{RH}k_c(k_t R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t)C_s \sqrt{t_p}W(t_p)}, \quad (2)$$

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. Это не постоянная, а случайная величина. Предельные отклонения защитного слоя бетона, согласно [8], приведены в табл. 1. Они позволяют выполнить теоретический анализ некоторых параметров распределения случайных отклонений σ . Что касается параметра μ_y , то можно заметить, что рекомендации [9] (μ составляет от –10 до 10 мм) соответствуют, скорее, требованиям [10]. Белорусские нормы приводят диапазон μ от –5 до +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 данных недостаточно, однако они указывают на еще большие значения средних отклонений.

Коэффициент относительной влажности k_{RH} можно рассчитать по следующему уравнению [7, 9, 12]:

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

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 [7, 12–14] рекомендуется использовать значения $g_e = 2,5$ и $f_e = 5,0$. Величину RH_{real} можно определить исходя из среднегодовых значений относительной влажности, определяемых по данным метеорологических станций для конкретной местности. В рассматриваемом исследовании значения относительной влажности принимали для железобетонных конструкций класса XC1 по условиям эксплуатации.

На параметр k_c оказывает влияние продолжительность ухода за бетоном t_c (табл. F.1–F.3 [5]). Согласно [12, 14]:

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

где t_c – продолжительность ухода за бетоном, дни; a_c – параметр регрессии, $a_c = 7^{b_c}$ (дни) [12, 13]; b_c – показатель регрессии при нормальном распределении ($\mu = -0,567$; $\sigma = 0,024$) [7, 14].

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

Таблица 1

Предельные отклонения защитного слоя бетона согласно [8, 10, 11]

Extreme deviations of concrete protective layer according to [8, 10, 11]

Номинальный размер a , мм	Допуск Δ (мм) по ГОСТ 13015.0 [8] при размере сечения, мм				Δa_{dev} (мм) по EN 1992-1-1 [10]	Δa_{dev} (мм) по DIN 1045-1 [11]
	<100	100–200	200–300	>300		
10–14	+4, –0	+5, –0	+6, –0	–	±10	±10 – внутренние элементы, ±15 – наружные элементы
4–19	+4, –3	+8, –3	+10, –3	+15, –5		
Более 19	±5	+8, –5	+10, –5	+15, –5		

Таблица 2

Значения параметра k_c для различных периодов продолжительности ухода за бетоном t_c согласно [7, 12, 14]Values of k_c -parameter for various duration on concrete curing t_c according to [7, 12, 14]

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 статье рассматривается пример железобетонного элемента с продолжительностью ухода за бетоном $t_c = 1$ день, $k_c = 3,0$. Эффективное сопротивление карбонизации зависит от эффективного коэффициента диффузии $D_{\text{reff},0}$ и способности связывания a_{CO_2} в бетоне:

$$R_{\text{NAC},0} = \frac{a_{\text{CO}_2}}{D_{\text{reff},0}}, \quad (5)$$

где a_{CO_2} – коэффициент, учитывающий способность CO_2 закрепляться в бетоне, кг $\text{CO}_2/\text{м}^3$; $D_{\text{reff},0}$ – эффективный коэффициент диффузии для бетона, $\text{м}^2/\text{с}$;

$$a_{\text{CO}_2} = 0,75m_{\text{CaO}}m_cDH \left(\frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}} \right), \quad (6)$$

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

Для расчета эффективного сопротивления карбонизации в бетоне с использованием (5) и (6) определим эффективный коэффициент диффузии углекислого газа ($\text{см}^2/\text{с}$) в капиллярно-пористой среде бетона по формуле, полученной М. Голшани [15]:

$$D_{\text{reff},0} = \frac{0,0025\Pi_k^2}{\sqrt[3]{V_k^2}}, \quad (7)$$

где Π_k – капиллярная пористость бетона, доли ед.; V_k – объем цементного камня в бетоне, доли ед.

Выражение для расчета эффективного сопротивления карбонизации бетона $R_{\text{NAC},0}$ ($\text{м}^2/\text{с}/(\text{кг}/\text{м}^3)$) (с использованием NAC-метода естественной карбонизации (5)) запишется следующим образом:

$$R_{\text{NAC},0} = \frac{\left(\frac{0,75m_{\text{CaO}}m_cDH \left(\frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}} \right)}{0,0025\Pi_k^2 \cdot 10^{-4}} \right)}{\sqrt[3]{V_k^2}} = \frac{\left(\frac{0,75m_{\text{CaO}}m_cDH \left(\frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}} \right)}{0,0025\Pi_k^2 \cdot 10^{-4}} \right)}{\sqrt[3]{\left(m_c \left(\frac{1}{\rho_c} + \frac{B/\Pi}{\rho_b} \right) \right)^2}}, \quad (8)$$

где B/Π – водоцементное отношение.

Уравнение для расчета капиллярной пористости бетона Π_k запишем согласно [16]

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

Согласно EN 206:2013 (E) [5], требования к качеству бетонов должны устанавливаться с учетом классов по условиям эксплуатации конструкций. Кроме того, следует учитывать требования к предельным значениям параметров бетонной смеси, приведенным в табл. 3, 4.

Таблица 3

Класс среды по условиям эксплуатации конструкций XC1 в зависимости от характеристики окружающей среды [5]

Environmental class according to operational conditions for structures XC1 and depending on characteristics of environment [5]

Класс среды по условиям эксплуатации	Характеристика окружающей среды	Пример для классов среды по условиям эксплуатации
XC1	Сухая или постоянно влажная	Элементы конструкций внутри помещений с низкой влажностью воздуха; элементы конструкций, постоянно находящиеся в воде

Предельные значения параметров бетонной смеси согласно EN 206:2013 [5]

Maximum values of concrete mixture according to EN 206:2013 [5]

Параметр бетонной смеси	Предельное значение параметра бетонной смеси в зависимости от класса XC1 (карбонизация)
Максимальное В/Ц	0,65
Минимальный класс по прочности	C ²⁰ / ₂₅
Минимальный расход цемента, кг/м ³	260

В проводимых исследованиях были запро-ектированы составы бетона под определен-ные классы бетона по прочности (C¹⁶/₂₀–C²⁵/₃₇) с использованием программы ВТК-коррозия. Исходные данные: портландцемент марок 400 и 500 (ОАО «Красносельскстройматериалы»); удельная поверхность 320 м²/кг; плотность це-мента 3070 кг/м³; нормальная густота 26 %; содержание C₃S = 56 %; содержание СаО в це-менте 0,62 доли ед.; мелкий заполнитель – есте-ственный песок с модулем крупности 2,5; круп-ный заполнитель – гранитный щебень фрак-ции 5–20.

Определили требуемое обратное эффек-тивное сопротивление карбонизации в бетоне $R_{NAC,0}^{-1}$ (с использованием (8)) для железобетон-ных конструкций класса XC1 по условиям экс-плуатации на период 50 лет для различных толщин защитного слоя (20, 25, 30, 35 мм) при концентрациях углекислого газа 0,00197 кг/м³ (1000 ppm) (табл. 5) и 0,00138 кг/м³ (700 ppm) (табл. 6). С использованием функции состоя-ния (2) в среде MATHEMATICA выполнили

вероятностное моделирование с учетом дан-ных, представленных в табл. 5.

Рекомендуемые составы бетона без добавок, соответствующие толщинам защитного слоя 20, 25, 30, 35 мм, для железобетонных конструкций класса XC1 по условиям эксплуатации на пери-од 50 лет при различных концентрациях угле-кислого газа представлены в табл. 7, 8, а с до-бавкой-пластификатором С-3 при различных концентрациях углекислого газа – в табл. 9, 10.

Запроектированы составы бетона с добавкой-пластификатором С-3 под определенные классы бетона по прочности на сжатие (C¹⁶/₂₀–C²⁵/₃₀) с использованием программы ВТК-коррозия. Исходные данные: портландцемент марок 400 и 500 (ОАО «Красносельскстройматериалы»); удельная поверхность 320 м²/кг; плотность це-мента 3070 кг/м³; нормальная густота 26 %; со-держание C₃S = 56 %; мелкий заполнитель – естественный песок с модулем крупности 2,5; крупный заполнитель – гранитный щебень фрак-ции 5–20; добавка-пластификатор С-3 – 0,6 % от массы цемента.

Таблица 5

Требуемое обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне при соблюдении нормируемого индекса надежности ($\beta = 1,50$) для железобетонных конструкций класса XC1 на период 50 лет при концентрации углекислого газа 0,00197 кг/м³

Required reverse efficient resistance of carbonation in concrete while observing specified reliability index ($\beta = 1.50$) in respect of reinforced concrete structures of XC1 Class for the period of 50 years with carbon dioxide gas concentration of 0.00197 kg/m³

Наименование базисной переменной	Значение параметра для класса XC1			
	20	25	30	35
Толщина защитного слоя бетона a , мм	20	25	30	35
Требуемое обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне $R_{NAC,0}^{-1}$, м ² /с/(кг СО ₂ /м ³)	255	400	580	777
Время ухода за бетоном t_c , день	1			
Относительная влажность воздуха окружающей среды RH_{real} , %	46			
Минимальная a_{RH} и максимальная b_{RH} влажность воздуха в помещении, %	30, 60			
Индекс надежности β	1,51	1,52	1,51	1,51

Таблица 6

Требуемое обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне при соблюдении нормируемого индекса надежности ($\beta = 1,5$) для железобетонных конструкций класса XC1 на период 50 лет при концентрации углекислого газа $0,00138 \text{ кг/м}^3$

Required reverse efficient resistance of carbonation in concrete while observing specified reliability index ($\beta = 1.50$) in respect of reinforced concrete structures of XC1 Class for the period of 50 years with carbon dioxide gas concentration of 0.00138 kg/m^3

Наименование базисной переменной	Значение параметра для класса XC1			
Толщина защитного слоя бетона a , мм	20	25	30	35
Требуемое обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне $R_{\text{NAC},0}^{-1}$, $\text{м}^2/\text{с}/(\text{кг CO}_2/\text{м}^3)$	350	555	798	1066
Время ухода за бетоном t_c , день	1			
Относительная влажность воздуха окружающей среды RH_{real} , %	46			
Минимальная a_{RH} и максимальная b_{RH} влажность воздуха в помещении, %	30, 60			
Индекс надежности β	1,54	1,51	1,50	1,55

Таблица 7

Составы бетона без добавок и значения $R_{\text{NAC},0}^{-1}$ для железобетонных конструкций класса XC1 по условиям эксплуатации на период 50 лет при концентрации углекислого газа $0,00197 \text{ кг/м}^3$

Composition of concrete without additives and values $R_{\text{NAC},0}^{-1}$ for reinforced concrete structures of XC1 Class according to operational conditions for the period of 50 years with carbon dioxide gas concentration of 0.00197 kg/m^3

Наименование базисной переменной	Значение параметра для класса XC1			
Толщина защитного слоя бетона a , мм	20	25	30	35
Требуемое обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне $R_{\text{NAC},0}^{-1}$, $\text{м}^2/\text{с}/(\text{кг CO}_2/\text{м}^3)$	255	400	580	775
Полученное обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне $R_{\text{NAC},0}^{-1}$, $\text{м}^2/\text{с}/(\text{кг CO}_2/\text{м}^3)$	253	395	561	750
Эффективный коэффициент диффузии для бетона D_{eff} , $\text{м}^2/\text{с}$	$1,19 \cdot 10^{-9}$	$1,79 \cdot 10^{-9}$	$2,09 \cdot 10^{-9}$	$2,30 \cdot 10^{-9}$
Подобранный класс бетона	$C^{30}/_{37}$	$C^{22}/_{27,5}$	$C^{20}/_{25}$	$C^{18}/_{22,5}$
Водоцементное отношение В/Ц	0,40	0,42	0,45	0,50
Масса цемента m_c для марки цемента М400, кг	386	397	347	295
Индекс надежности β	1,56	1,56	1,64	1,62
Расчетная ожидаемая прочность бетона R_{28} для полученного класса бетона, МПа	47,5	35,1	32,1	28,9
Требуемая прочность бетона на сжатие R_{28} для класса бетона $C^{20}/_{25}$	32,2			

В табл. 4 представлены предельные значения параметров бетонной смеси, где максимальное водоцементное отношение для класса XC1 по эксплуатации составляет 0,65. Для подобранных при исследовании составов бетона получены В/Ц в пределах от 0,371 до 0,550. Согласно требованиям EN 206:2013 [5], для бетона класса XC1 по эксплуатации минимальный расход цемента составляет 260 кг/м^3 , а в подобранных составах бетона расход цемента коле-

бался в пределах $268\text{--}530 \text{ кг/м}^3$. В [5] минимальный класс по прочности на сжатие для класса XC1 по условиям эксплуатации составляет $C^{20}/_{25}$, а для подобранных составов бетона получены классы по прочности на сжатие от $C^{16}/_{20}$ до $C^{30}/_{37}$ в зависимости от толщины защитного слоя.

Рассчитав составы бетона под определенные классы бетона по прочности ($C^{16}/_{20}\text{--}C^{30}/_{37}$), получаем рекомендуемые показатели по классу

бетона по прочности и толщину защитного слоя. В европейских нормах содержатся требования, определяющие максимальное В/Ц, минимальное содержание цемента и минимальный класс бетона по прочности, который должен соответствовать классу XC1 по условиям эксплуатации. Однако обоснования данных требований отсутствуют. В связи с этим пред-

принята попытка получить научное обоснование требований, содержащихся в европейских нормах, исходя из класса по условиям эксплуатации железобетонных конструкций. Для решения данной задачи использовали вероятностное моделирование глубины карбонизации бетона с учетом рассчитанного состава бетона по программе ВТК-коррозия.

Таблица 8

Составы бетона без добавок и значения $R_{NAC,0}^{-1}$ для железобетонных конструкций класса XC1 по условиям эксплуатации на период 50 лет при концентрации углекислого газа 0,00138 кг/м³

Composition of concrete without additives and values $R_{NAC,0}^{-1}$ for reinforced concrete structures of XC1 Class according to operational conditions for the period of 50 years with carbon dioxide gas concentration of 0.00138 kg/m³

Наименование базисной переменной	Значение параметра для класса XC1			
	20	25	30	35
Толщина защитного слоя бетона a , мм	20	25	30	35
Требуемое обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне $R_{NAC,0}^{-1}$, м ² /с/(кг СО ₂ /м ³)	350	555	798	1066
Полученное обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне $R_{NAC,0}^{-1}$, м ² /с/(кг СО ₂ /м ³)	349	555	777	1066
Подобранный класс бетона	C ²⁸ / ₃₅	C ²⁰ / ₂₅	C ²⁰ / ₂₅	C ¹⁶ / ₂₀
Водоцементное отношение В/Ц	0,41	0,45	0,45	0,55
Марка цемента, масса цемента m_c , кг	M500, 386	M400, 347	M400, 486	M400, 268
Индекс надежности β	1,55	1,51	1,55	1,55
Расчетная ожидаемая прочность R_{28} для полученного класса бетона, МПа	45,0	32,1	32,1	25,7
Требуемая прочность бетона на сжатие R_{28} для класса бетона C ²⁰ / ₂₅	32,2			

Таблица 9

Составы бетона с добавкой-пластификатором С-3 и значения $R_{NAC,0}^{-1}$ для железобетонных конструкций класса XC1 по условиям эксплуатации на период 50 лет при концентрации углекислого газа 0,00197 кг/м³

Composition of concrete with additive (plasticizer C-3) and values $R_{NAC,0}^{-1}$ for reinforced concrete structures of XC1 Class according to operational conditions for the period of 50 years with carbon dioxide gas concentration of 0.00197 kg/m³

Наименование базисной переменной	Значение параметра для класса XC1			
	20	25	30	35
Толщина защитного слоя бетона a , мм	20	25	30	35
Требуемое обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне $R_{NAC,0}^{-1}$, м ² /с/(кг СО ₂ /м ³)	255	400	580	775
Полученное обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне $R_{NAC,0}^{-1}$, м ² /с/(кг СО ₂ /м ³)	257	407	580	782
Эффективный коэффициент диффузии для бетона D_{eff} , м ² /с	$9,71 \cdot 10^{-10}$	$1,21 \cdot 10^{-9}$	$2,01 \cdot 10^{-9}$	$2,52 \cdot 10^{-9}$
Подобранный класс бетона	C ²⁰ / ₂₅	C ²⁰ / ₂₅	C ¹⁸ / _{22,5}	C ¹⁸ / _{22,5}
Водоцементное отношение В/Ц	0,36	0,39	0,41	0,47
Масса цемента m_c для марки цемента М400, кг	516	486	466	332
Индекс надежности β	1,52	1,50	1,51	1,53
Расчетная ожидаемая прочность R_{28} для полученного класса бетона, МПа	42,4	38,9	36,5	30,9
Требуемая прочность бетона на сжатие R_{28} для класса бетона C ²⁰ / ₂₅	32,2			

Таблица 10

Составы бетона с добавкой-пластификатором С-3 и значения $R_{NAC,0}^{-1}$ для железобетонных конструкций класса ХС1 по условиям эксплуатации на период 50 лет при концентрации углекислого газа 0,00138 кг/м³

Composition of concrete with additive (plasticizer C-3) and values $R_{NAC,0}^{-1}$ for reinforced concrete structures of XC1 Class according to operational conditions for the period of 50 years with carbon dioxide gas concentration of 0.00138 kg/m³

Наименование базисной переменной	Значение параметра для класса ХС1			
	20	25	30	35
Толщина защитного слоя бетона a , мм	20	25	30	35
Требуемое обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне $R_{NAC,0}^{-1}$, м ² /с/(кг СО ₂ /м ³)	350	555	798	1066
Полученное обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне $R_{NAC,0}^{-1}$, м ² /с/(кг СО ₂ /м ³)	354	557	799	1067
Подобранный класс бетона	C ²⁸ / ₃₅	C ²⁵ / ₃₀	C ²⁵ / ₃₀	C ¹⁸ / _{22,5}
Водоцементное отношение В/Ц	0,38	0,41	0,45	0,48
Марка цемента, масса цемента m_c , кг	M500, 430	M500, 467	M500, 322	M400, 295
Индекс надежности β	1,52	1,51	1,52	1,52
Расчетная ожидаемая прочность R_{28} для полученного класса бетона, МПа	47,5	46,1	40,6	30,2
Требуемая прочность бетона на сжатие R_{28} для класса бетона C ²⁰ / ₂₅	32,2			

В табл. 5–10 представлены подтверждения предельных значений В/Ц и расхода цемента на 1 м³ бетона согласно EN 206:2013 [5]: 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 C²⁰/₂₅ исходя из требуемой толщины защитного слоя бетона. Полученные составы бетона удовлетворяют нормируемому индексу надежности $\beta = 1,50$ для требуемых толщин защитного слоя бетона.

При подборе составов бетона для класса ХС1 по условиям эксплуатации получены составы бетона, соответствующие классам C¹⁶/₂₀–C³⁰/₃₇, и расчетная прочность в пределах 25,7–47,5 МПа в зависимости от требуемой толщины защитного слоя бетона (20, 25, 30, 35 мм) и условий эксплуатации (т. е. концентрации СО₂ в помещении от 0,00138 до 0,00197 кг/м³). Чем меньше толщина защитного слоя бетона, тем прочность бетона должна быть больше 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.

2. Рассчитаны обратные эффективные сопротивления карбонизации бетона для различных составов бетона. Получены требуемые обратные эффективные сопротивления карбонизации бетона $R_{NAC,0}^{-1}$ для класса ХС1 по условиям эксплуатации для толщин защитного слоя 20–35 мм, удовлетворяющие нормируемому индексу надежности $\beta = 1,5$ 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 класса ХС1 по условиям эксплуатации, который показал, что необходимо назначать класс бетона по прочности на сжатие в зависимости от требуемой толщины защитного слоя бетона, условий и сроков эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01–2002. Введ. 01.07.2003. Минск: Минстройархитектуры, 2003. 144 с.
2. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций: ТКП ЕН 1990–2011. Введ. 01.07.2012. Минск: Минстройархитектуры, 2012. 70 с.
3. Надежность строительных конструкций. Общие принципы: СТБ ISO 2394–2007. Введ. 01.07.2008. Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2008. 69 с.

4. Возведение бетонных и железобетонных конструкций: СТБ EN 13670–2012. Введ. 01.01.2013. Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2013. 54 с.
5. European Standard. Concrete – Specification, Performance, Production and Conformity: EN 206:2013 (E). Brussels: European Committee for Standardization, 2013. 93 p.
6. DuraCrete (1998) Modelling of Degradation, DuraCrete – Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures. EU – Brite EuRam III, Contract BRPR-CT95–0132, Project BE95–1347/R4–5, December 1998. 174 p.
7. Gehlen, C. Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur Wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion / C. Gehlen; Aachen, Techn. Hochsch. Berlin: Beuth-Verlag, 2000. 106 p. (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton; 510).
8. Конструкции и изделия бетонные и железобетонные сборные. Общие технические требования: ГОСТ 13015.0–83. Введ. 01.01.1984. М.: Госстандарт СССР, 1983. 14 с.
9. Probabilistic Model Code [Electronic Resource] // JCSS Joint Committee of Structural Safety, 2001. Mode of Access http://www.jcss.byg.dtu.dk/Publications/Probabilistic_Model_Code.aspx. Date of Access: 15.03.2009.
10. 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.
11. Deutsche Norm. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion: DIN 1045-1:2001. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2001. 183 p.
12. DARTS – Durable and Reliable Tunnel Structures: Deterioration Modelling, European Commission, Growth 2000, Contract GIRD-CT-2000-00467, Project GrDI-25633, 2004.
13. Bulletin Comité Euro-International du Béton (CEB) No 238: New Approach to Durability Design – an Example for Carbonation Induced Corrosion. Lausanne, 1997. 152 p.
14. LIFECON: Prototype of a Condition Assessment Protocol, Deliverable D3/1, Working Party 3, Project GIRD-CT-2000-00378, 2003. 169 p.
15. Голшани, М. Структура бетона с добавками ингибиторов коррозии стали и его защитные свойства по отношению к стальной арматуре / М. Голшани. Минск: БНТУ, 2012. 199 с.
16. Бабицкий, В. В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона / В. В. Бабицкий. Минск: БНТУ, 2005. 540 с.
2. ТКР EN 1990–2011 Eurocode. Basis of Structural Design. Minsk: Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of Belarus, 2012. 70 (in Russian).
3. STB [Standards of the Republic of Belarus] ISO 2394–2007. Reliability of Construction Structures. General Principles. Minsk, State Committee for Standardization of the Republic of Belarus, 2008. 69 (in Russian).
4. STB [Standards of the Republic of Belarus] EN 13670–2012. Construction of Concrete and Reinforced Concrete Structures. Minsk, State Committee for Standardization of the Republic of Belarus, 2013. 54 (in Russian).
5. EN 206:2013 (E). European Standard. Concrete – Specification, Performance, Production and Conformity. Brussels, European Committee for Standardization, 2013. 93.
6. DuraCrete (1998) Modelling of Degradation, DuraCrete – Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures. EU – Brite EuRam III, Contract BRPR-CT95–0132, Project BE95–1347/R4–5, December 1998. 174.
7. Gehlen C. (2000) Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur Wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. *Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton*, Heft 510. Berlin, Beuth-Verlag. 106 (in German).
8. GOST [State Standard] 13015.0–83. Precast Concrete and Reinforced Concrete Structures and Products. General Technical Requirements. Moscow: State Committee for Standards and Product Quality Management, 1983. 14 (in Russian).
9. Probabilistic Model Code. *JCSS Joint Committee of Structural Safety*. 2001. Available at: http://www.jcss.byg.dtu.dk/Publications/Probabilistic_Model_Code.aspx. (Accessed 15 March 2009).
10. EN 1992-1-1:2004 (E). Eurocode 2. Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2004. 225.
11. DIN 1045-1:2001. Deutsche Norm. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2001. 183.
12. DARTS – Durable and Reliable Tunnel Structures: Deterioration Modelling, European Commission, Growth 2000, Contract GIRD-CT-2000-00467, Project GrDI-25633, 2004.
13. Comité Euro-International du Béton (CEB). (1997). *Bulletin CEB. New Approach to Durability Design – an Example for Carbonation Induced Corrosion* (238). Lausanne, Switzerland. 152.
14. LIFECON: Prototype of a Condition Assessment Protocol, Deliverable D3/1, Working Party 3, Project GIRD-CT-2000-00378, 2003. 169 p.
15. Golshani M. (2012) *Structure of Concrete with Steel Corrosion Inhibitory Additives and its Protective Properties in Regard to Reinforcement Steel*. Minsk: BNTU [Belarusian National Technical University]. 199 (in Russian).
16. Babitskiy V. V. (2005) *Structure and Corrosion Resistance of Concrete and Reinforced Concrete*. Minsk: BNTU [Belarusian National Technical University]. 540 (in Russian).

Поступила 09.02.2016

Подписана в печать 19.04.2016

Опубликована онлайн 29.11.2016

REFERENCES

1. SNB 5.03.01–2002 [Construction Norms of the Republic of Belarus]. Concrete and Reinforced Concrete Structures. Minsk: Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of Belarus, 2003. 144 (in Russian).

Received: 09.02.2016

Accepted: 19.04.2016

Published online: 29.11.2016