

**ДИФФУЗИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА
В БЕТОН СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
И ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ
ИНТЕРВАЛЬНЫМ МЕТОДОМ**

Г.Д. Шмелев, С.А. Варюшкин

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный архитектурно-строительный университет», г. Воронеж

Рецензент д-р физ.-мат. наук, профессор В.А. Козлов

Ключевые слова и фразы: глубина карбонизации; класс бетона; углекислый газ; цементный бетон.

Аннотация: На основании исследовательских данных различных авторов определена зависимость коэффициента диффузии углекислого газа в тело бетона от прочности структурного скелета цементного камня. Предложенная зависимость используется при прогнозировании глубины карбонизации эксплуатируемых железобетонных конструкций.

Обозначения: A , A_1 – коэффициенты, учитывающие качество материалов; B – численное значение класса бетона по прочности на сжатие; C_0 – концентрация углекислого газа в относительных единицах; D – коэффициент диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$; D' – среднее значение коэффициента диффузии углекислого газа в бетон за интервал времени 50 лет, $\text{см}^2/\text{с}$; f_k – степень карбонизации бетона; $G_{\text{ц}}$ – количество цемента, $\text{г}/\text{дм}^3$ бетона; $P_{\text{СаО}}$ – количество СаО в соединениях цемента; R_b – прочность бетона в возрасте 28 суток, МПа; $R_{\text{ц}}$ – активность цемента, МПа; t_k – продолжительность карбонизации, с; x_{CO_2} – глубина карбонизации бетона, см; Ц/В – цементно-водное отношение.

Введение

Одной из причин начала разрушения железобетонных конструкций зданий и сооружений является коррозия арматуры. Наиболее сильно она проявляется в конструкциях, подверженных постоянному воздействию

Шмелев Геннадий Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и хозяйство», e-mail: shmelev8@mail.ru; Варюшкин Сергей Анатольевич – ассистент кафедры «Городское строительство и хозяйство», ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный архитектурно-строительный университет», г. Воронеж.

атмосферной или техногенной воды. Однако, как показывает практика эксплуатации зданий и сооружений различного назначения, даже в случае отсутствия увлажнения бетона со временем происходит коррозия арматуры. Основной причиной начала коррозии стальной арматуры является прекращение пассивирующего действия защитного слоя бетона конструкции. Щелочная среда свежеприготовленного бетона ($pH \sim 12 \dots 13$) со временем снижает показатель щелочности (кислотности) за счет прохождения процесса карбонизации составляющих бетона углекислым газом. В результате такого воздействия происходит карбонизация защитного слоя бетона, и создаются начальные условия для дальнейшего развития коррозионных процессов на поверхности стальной арматуры.

Расчетное обоснование коэффициента диффузии углекислого газа в бетон

Скорость протекания процесса карбонизации бетона зависит от состава и структуры цементного камня, концентрации углекислого газа и величины коэффициента диффузии. Рассмотрим возможность оценки коэффициента диффузии на основании интервального подхода.

В рекомендациях [1] величину коэффициента диффузии предлагают определять по формуле

$$D' = \frac{0,2G_{\text{ц}}P_{\text{CaO}}f_{\text{к}}x_{\text{CO}_2}}{C_{\text{o}}t_{\text{к}}} \quad (1)$$

Определим усредненное значение коэффициента диффузии с помощью формулы (1), используя различные данные. Значения P_{CaO} и $f_{\text{к}}$ примем равными 0,6 при отсутствии других данных [1]. Средняя концентрация углекислого газа в атмосфере составляет от 0,035 до 0,07 % по объему [2].

В таблице 1 приведены средние данные из различных литературных источников по глубине карбонизации защитного слоя бетона различной начальной прочности на сжатие в течение 50 лет [3].

Таблица 1

Средние данные по глубине карбонизации защитного слоя за 50 лет

Источник	Глубина карбонизации, мм, при прочности бетона, МПа				
	до 25	30	37	45	60
Хамада М. [4]	24...85	20...70	16...57	13...47	10...35
Смольчик Х.Г. [5]	24,5...46	21,4...33,5	–	10,2...21,7	0...13,7
Кондо Р. и др. [6]	–	–	–	33	22
Schneider U. и др. [7]	–	–	69,4	–	52
НИИЖБ [8]	25...54	21...33	–	9...22	0...18

Представленные в табл. 1 данные имеют существенный разброс значений глубины карбонизации в пределах одного значения прочности бетона, что указывает на значительную неоднородность бетонов, разные условия их изготовления и проведения испытаний.

В целях определения содержания цемента в бетоне воспользуемся известными расчетными формулами прочности [9, 10]:

– обычных бетонов ($\text{Ц/В} = 1,4 \dots 2,5$)

$$R_{\text{б}} = AR_{\text{ц}}(\text{Ц/В} - 0,5); \quad (2)$$

– высокопрочных бетонов М500 – М800 ($\text{Ц/В} > 2,5$)

$$R_{\text{б}} = A_1 R_{\text{ц}}(\text{Ц/В} + 0,5). \quad (3)$$

Величина цементно-водного отношения Ц/В , выраженная из формул (2) и (3):

– для обычного бетона

$$\text{Ц/В} = \frac{R_{\text{б}} + 0,5AR_{\text{ц}}}{AR_{\text{ц}}}; \quad (4)$$

– для высокопрочных бетонов

$$\text{Ц/В} = \frac{R_{\text{б}} - 0,5AR_{\text{ц}}}{AR_{\text{ц}}}; \quad (5)$$

Расход воды на 1 м^3 бетона в зависимости от жесткости или подвижности бетонной смеси определяется с учетом крупности зерен заполнителя по [9] и изменяется в пределах от 135 до 235 л/м^3 . В соответствии с нормативными требованиями [10] минимальный расход цемента в железобетонных конструкциях не должен быть менее 220 кг/м^3 .

С использованием формул (4) и (5), а также требований по расходу цемента [10] с использованием интервального подхода рассчитаем для каждого класса бетона, рассматриваемого как конструкционный, минимальный и максимальный расходы цемента на 1 м^3 . Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Данные по расходу цемента на 1 м^3 для различных классов бетона

Класс бетона по прочности	Марка (активность) цемента	Содержание цемента по расчету, кг		
		минимальное	максимальное	среднее
В7.5	300	167,0	221,0	194,0
В10	300	209,0	282,0	245,5
В15	400	209,0	282,0	245,5
В20	400	273,0	373,0	323,0
В25	400	–	–	–
В30	500	285,0	391,0	338,0
В35	550	290,0	397,0	294,0
В40	600	237,0	350,0	293,5
В45	600	301,0	440,0	370,5
В60	600	429,0	500,0	464,5

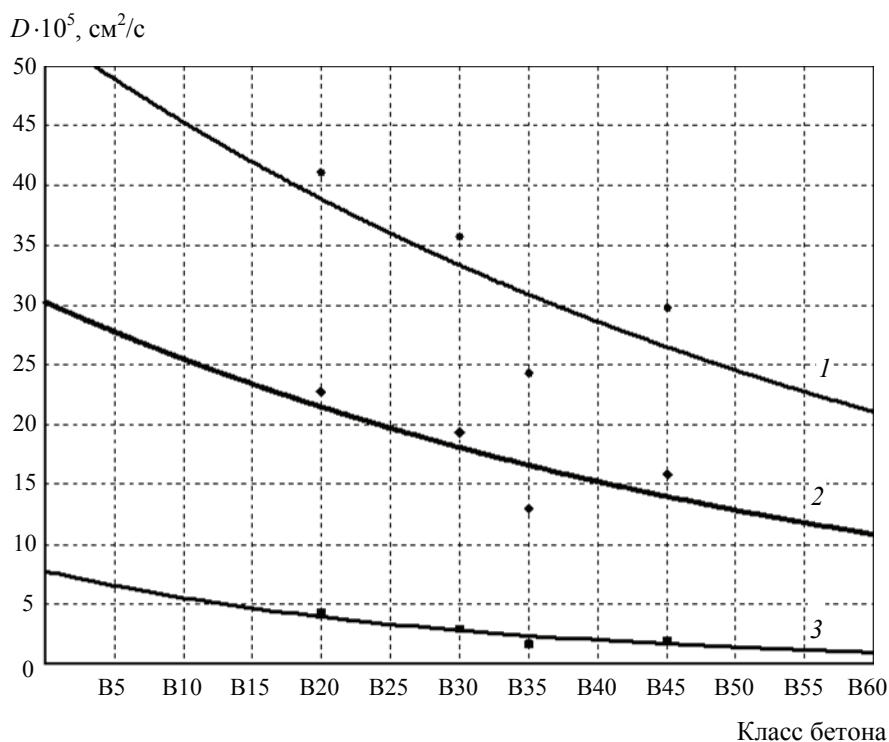
Используя данные, представленные в табл. 1 и 2, по формуле (1) определим верхнюю и нижнюю границы интервала, в которых может находиться значение среднего коэффициента диффузии для каждого класса бетона при продолжительности эксплуатации бетонной или железобетонной конструкции 50 лет. Результаты проведенных расчетов показаны в табл. 3.

С использованием полученных в ходе проведенного расчета интервальных значений коэффициента диффузии определим наиболее адекватную регрессионную модель и коэффициенты уравнения аппроксимации. По полученным коэффициентам уравнения аппроксимации построим график зависимости среднего коэффициента диффузии от класса бетона по прочности на сжатие, а также графики границ верхнего и нижнего интервалов (рисунок).

Таблица 3

Значения коэффициента диффузии углекислого газа в бетон

Класс бетона по прочности на сжатие	$D \cdot 10^{-5}, \text{см}^2/\text{с}$		
	минимальное	максимальное	среднее
B20	4,27	41,4	22,8
B30	2,97	35,7	19,3
B35	1,70	24,3	13,0
B45	1,96	29,8	15,8



Зависимость коэффициента диффузии от класса бетона по прочности на сжатие:
1 – верхняя граница; 2 – среднее значение; 3 – нижняя граница

Таблица 4

Средние значения коэффициента диффузии углекислого газа в бетон для различных нормируемых классов бетона по прочности на сжатие

Нормируемый класс бетона по прочности на сжатие	$D' \cdot 10^{-5}$, см ² /с	
	по регрессии	из табл. 3
B10	27,3	–
B15	24,9	–
B20	22,8	22,8
B25	20,9	–
B30	19,3	19,3
B35	17,9	13,0
B40	16,8	–
B45	15,9	15,8
B50	15,2	–
B55	14,8	–
B60	14,6	–

Представленное на рисунке среднее значение коэффициента диффузии (график 2), полученное по результатам статистической обработки и регрессионного анализа, описывается уравнением регрессионной модели вида

$$D' = 3,271 \cdot 10^{-4} - 5,893 \cdot 10^{-6} B + 4,787 \cdot 10^{-8} B^2. \quad (6)$$

Прогнозирование числовых значений среднего коэффициента диффузии для нормируемых значений классов бетона по прочности на сжатие, выполненное с использованием уравнения (6), представлено в табл. 4, где расчетные значения коэффициента диффузии углекислого газа в бетон, полученные по регрессионной модели (6), приведены для всех нормируемых классов бетона по прочности. Для сравнения рядом приведены величины, полученные расчетом по средним значениям из интервала данных по табл. 3.

Результаты прогноза среднего коэффициента диффузии углекислого газа в бетон, полученные по формуле (6), хорошо согласуются со средними значениями коэффициента диффузии, полученными из расчета. Расхождения для класса бетона В35 между значениями, взятыми из табл. 3 и полученными по регрессионной модели (6), могут быть объяснены только использованием в расчетах приближенных данных по содержанию цемента, а также промежуточной марки бетона М550.

Полученные значения среднего коэффициента диффузии углекислого газа в бетон могут быть использованы для оценочных расчетов при определении глубины карбонизации защитного слоя бетона и прогнозирования сроков службы железобетонных конструкций в нормальных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Рекомендации по обеспечению надежности и долговечности железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений при их реконструкции и восстановлении / Харьковский ПромстройНИИпроект. – М. : Стройиздат, 1990. – 62 с.
2. Сорохтин, О.Г. Природа парникового эффекта [Электронный ресурс] / О.Г. Сорохтин, С.А. Ушаков. – Режим доступа : http://goshasampras.narod.ru/new_page_60.htm. – Загл. с экрана.
3. Несветаев, Г.В. Обеспечение долговечности железобетона и нормативные документы / Г.В. Несветаев // Бетон и железобетон в третьем тысячелетии : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Ростов. гос. строит. ун-т. – Ростов н/Д, 2000. – С. 264.
4. Хамада, М. Карбонизация бетона и коррозия арматурной стали / М. Хамада // Пятый Междунар. конгресс по химии цемента / под общ. ред. О.П. Мчедлова-Петросяна и Ю.М. Бутта. – М., 1973. – С. 306–307.
5. Смольчик, Х.Г. Дискуссия / Х.Г. Смольчик // Пятый Междунар. конгресс по химии цемента / под общ. ред. О.П. Мчедлова-Петросяна и Ю.М. Бутта. – М., 1973. – С. 308.
6. Кондо, Р. Механизм и кинетика карбонизации затвердевшего цемента / Р. Кондо, М. Даймон, Т. Акиба // Пятый Междунар. конгресс по химии цемента / под общ. ред. О.П. Мчедлова-Петросяна и Ю.М. Бутта. – М., 1973. – С. 309–310.
7. Schnieder, U. Durability of High Pormance (HPC) Compared with Normal Concret / U. Schnieder, G. Scherpke, E. Stangl // Durable Reinforced Concrete Structures. – Aedificatio Publishers, 1998. – P. 3–31.
8. Повышение стойкости бетона и железобетона при воздействии агрессивных сред / под ред. В.М. Москвина, Ю.А. Савиной. – М. : Стройиздат, 1975. – С. 236 с.
9. Попов, Л.И. Строительные материалы и детали / Л.И. Попов. – М. : Стройиздат, 1986. – 336 с.
10. СНиП 5.01.23–83. Типовые нормы расхода цемента для приготовления бетонов сборных и монолитных бетонных, железобетонных изделий и конструкций / Госстрой СССР. – М. : Стройиздат, 1985. – 44 с.

Diffusion of Carbon Dioxide Concrete Construction and Evaluation the Diffusion Coefficient of Interval Methods

G.D. Shmelev, S.A. Varyushkin

Voronezh State University of Architecture and Construction, Voronezh

Key words and phrases: carbon dioxide; cement concrete; concrete class; depth of carbonation.

Abstract: Based on research data of different authors determined the dependence of the diffusion coefficient of carbon dioxide in the body of the concrete on the strength of the structural skeleton of cement. The proposed relationship can be successfully used in predicting the depth of carbonation operated concrete.

© Г.Д. Шмелев, С.А. Варюшкин, 2013