

УДК 624.01/04

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ВОЗДУХА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА

Приведены результаты исследования распределения эффективного коэффициента диффузии углекислого газа воздуха (D') по сечению бетона при хранении его в течение года в атмосферных условиях. Показано, что значения D' для одного состава бетона по абсолютным значениям в течение года значительно изменяются не только во времени, но и по сечению бетона, что не позволяет использовать 1-й закон Фика (с основой на применении индикаторного теста) для оценки карбонизации бетона в реальных условиях эксплуатации.

Введение. Карбонизация является самым распространенным видом коррозии бетона элементов и конструкций, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях. Она вызывает структурные изменения цементного камня, способствующие деградации защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК), эксплуатируемых в воздушных средах, способствуя образованию и развитию процессов коррозии стальной арматуры различной степени интенсивности.

Механизм карбонизации и влияние карбонизации на защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре изучались различными авторами [1].

Механизм карбонизации бетона в лабораторных условиях исследовали на отвержденных образцах в идеализированных условиях, опираясь на теорию внутренней массопередачи гетерогенного процесса, который основывается на теоретическом обосновании глубины проскока CO_2 в поровой влаге бетона. В соответствии с [2] он включает в себя: диффузию CO_2 в порах и капиллярах бетона; растворение CO_2 в жидкой фазе бетона, образование угольной кислоты, ее диссоциацию на ионы водорода, бикарбонат- и карбонат-ионы; диффузию образовавшихся ионов в жидкой фазе; растворение гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ее диссоциацию и диффузию ионов Ca^{2+} и OH^- ; химическое взаимодействие H_2CO_3 с растворенной $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с образованием бикарбоната и карбоната кальция; кристаллизацию CaCO_3 .

Принято [2], что поглощение углекислого газа в капиллярах бетона происходит в узкой (≈ 1 мм) зоне.

Для вывода основного уравнения карбонизации [2] принимали следующие допущения:

- падение концентрации CO_2 в порах бетона линейно. У поверхности бетона концентрация CO_2 соответствует концентрации его в окружающем воздухе, а в зоне химической реакции равна нулю;

- концентрация CO_2 в отдельных точках по сечению образца при каждом положении фронта карбонизации успевает установиться, поскольку скорость его продвижения и скорость диффузионного перемещения CO_2 в порах бетона существенно различны.

Это означает, что градиент концентрации для небольших отрезков времени является постоянной величиной. Такое допущение позволило для расчетов толщины карбонизированного слоя использовать уравнение 1-го закона Фика:

$$dm = \frac{D'S(C_0 - C)}{x} d\tau, \quad (1)$$

где dm – количество диффундирующего вещества через данное поперечное сечение, см^2 при нормальных условиях; D' – эффективный коэффициент диффузии CO_2 , $\text{см}^2/\text{с}$; S – площадь поперечного сечения, см^2 ; C_0 – концентрация CO_2 в окружающей среде, в относительных величинах по объему; C – концентрация CO_2 в зоне взаимодействия с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, принимают $C = 0$; $d\tau$ – время воздействия на бетон CO_2 , с; x – толщина нейтрализованного слоя по фенолфталеиновому индикатору, см.

$$dm = m_0 S dx, \quad (2)$$

где m_0 – реакционная емкость бетона – количество CO_2 , поглощенного единицей объема бетона, или объемная концентрация связанного CO_2 .

Тогда

$$m_0 S dx = \frac{D'S(C_0 - C)}{x} d\tau; \quad (3)$$

$$\int x dx = \int \frac{D'(C_0 - C)}{m_0} d\tau. \quad (4)$$

После интегрирования

$$\frac{x^2}{2} = D'(C_0 - C). \quad (5)$$

Так как $C = 0$, то последнее выражение позволяет определять D' по экспериментальным данным и получить выражение основного закона карбонизации:

$$D' = \frac{m_0 x^2}{2C_0 \tau}; \quad (6)$$

$$x = \sqrt{\frac{2D'C_0\tau}{m_0}}. \quad (7)$$

Сложность определения D' состоит в том, что для получения изменения во времени значений m_0 и x требуются длительные сроки воздействия CO_2 воздуха на бетон. Поскольку исследования проводились в лабораторных условиях, то концентрация CO_2 принималась 10 и 20 %.

При краткосрочных испытаниях в лабораторных условиях бетонов различных составов были получены значения $D' = 1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$ [1].

Необходимо отметить, что условия экспериментов (концентрация CO_2 , отсутствие изменений влажности и температуры и т.д.) абсолютно не соответствовали реальным условиям эксплуатации большинства ЖБЭ и ЖБК.

Результаты экспериментов и их обсуждение. В работах [1, 3] экспериментально было убедительно доказано, что карбонизация по сечению бетона (как лабораторных образцов, так и реально эксплуатируемых ЖБЭ) распространяется не фронтально, а по экспоненциальной зависимости (степень карбонизации бетона максимальна в поверхностных слоях). Кроме того, в работе [4] на основании расчета эффективного коэффициента диффузии по формуле (7) по полученным значениям карбонатной составляющей по сечению бетонов различных элементов, эксплуатировавшихся длительные сроки, показано, что D' – величина непостоянная по сечению бетона и значения D' на несколько порядков ниже значений, полученных в лабораторных условиях авторами [2], что в значительно большей степени соответствуют химическим представлениям о размерности коэффициента диффузии CO_2 .

Значительный интерес представляет исследование изменения эффективного коэффициента диффузии CO_2 по сечению бетонов одного состава и его изменения во времени при одинаковых условиях эксплуатации для оценки возможности его применения (на основании существующей теории карбонизации) при описании процессов карбонизации, ее оценки и прогнозирования.

Объектами исследования служили бетонные кубики сеч. $100 \times 100 \times 100$ мм, изготовленные в заводских условиях из бетонов различных составов и исследованные при различных условиях эксплуатации.

Было изготовлено две серии по два куба одного состава на каждый класс бетона по прочности. После изготовления образцы бетона подвергались ТВО по стандартному режиму.

В качестве примера рассмотрим определение эффективного коэффициента диффузии в бетоне класса по прочности $\text{C}^{18}/_{22,5}$.

Состав образцов приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав образцов бетона

Класс бетона по прочности на сжатие	Состав смеси, кг/м ³				
	Ц	П	Щ	В	С-3, κ = 10 %
$\text{C}^{18}/_{22,5}$	333	728	1215	159	34

Примечание – Ц, П, Щ, В, С-3 – массы цемента, песка, щебня, воды, суперпластификатора, кг

Для изготовления кубиков был использован цемент марки ПЦ500 Костюковичского завода.

Образцы по сечению исследовали сразу после изготовления, через 28 суток, 0,7 года и 1 года хранения в атмосферных условиях (класс по условиям эксплуатации ХС4 [5]). Атмосферные условия в помещении лаборатории были созданы следующим образом: два раза в день (в 8^{00} и 14^{00}) кубики погружались в воду, после чего устанавливались на деревянные подставки на 3 часа под вентилятор; таким образом, они ежедневно проходили двойной цикл увлажнения и высыхания.

При исследовании кубов отбирали образцы бетона – порошки, получаемые выбуриванием по сечению кубов с шагом 5 мм. Карбонатную составляющую определяли по методике [3].

Эффективный коэффициент диффузии рассчитывали, используя в выражении (6) данные не индикаторного метода, а результаты определения карбонатной составляющей (показателя КС) в пробах бетона, отобранных по сечению бетона. При этом реакционную ем-

кость бетона определяли по формуле

$$m_0 = 2V_0\rho, \quad (8)$$

где 2 – коэффициент приведения объема газа к объему, выделившемуся навеской пробы массой 1 г; V_0 – объем газа, приведенный к нормальным условиям, см^3 ; ρ – плотность бетона, $\text{г}/\text{см}^3$; $\rho = 2,435 \text{ г}/\text{см}^3$.

По результатам эксперимента построены кривые изменения показателей КС и D' по сечению исследованных образцов (рисунки 1 и 2).

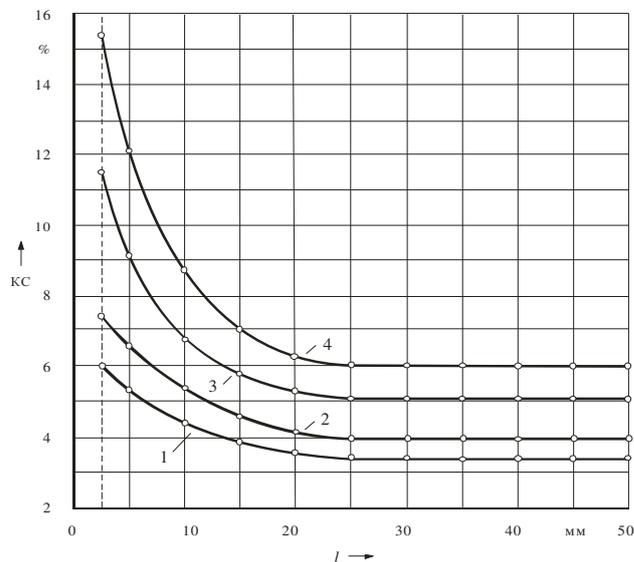


Рисунок 1 – Изменение карбонатной составляющей (показателя КС) по сечению бетона:

1–4 – соответственно, сразу после ТВО, через 28 суток, 0,7 года и 1 год

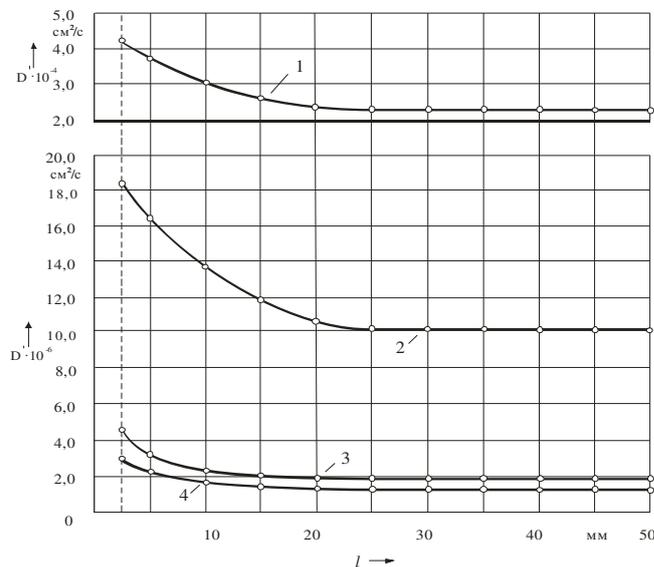


Рисунок 2 – Изменение эффективного коэффициента диффузии CO_2 (показателя D') по сечению бетона:

1–4 – соответственно сразу после ТВО, через 28 суток, 0,7 года и 1 год

Из анализа полученных графиков видно, что:

- характер распределения карбонатов и эффективного коэффициента диффузии по сечению бетона идентичны;

- по сечению бетона величины КС и D' непостоянны, они изменяются от больших значений на поверхности к меньшим – в глубине бетона, при этом их наиболее интенсивное изменение наблюдается в поверхностных слоях бетона;

– во времени значения KC плавно растут по сечению бетона, а значения D' – значительно уменьшаются. При этом уже через 1 год абсолютные значения D' по сравнению с начальными, меньше на два порядка (их размерность изменяется от 10^{-4} до 10^{-6});

– через полгода в глубине бетона, там, где практически не сказывается влияние условий хранения (температура, влажность, концентрация CO_2 и т. д.), величины D' изменяются незначительно, и их размерность составляет $10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$.

Аналогичные результаты получены для бетонов других составов, исследованных при хранении в помещении и в атмосферных условиях.

Результаты экспериментов позволили сделать следующие выводы:

– полученные по результатам исследований в реальных условиях эксплуатации лабораторных образцов бетона значения эффективного коэффициента диффузии CO_2 воздуха для одного состава бетона по абсолютным значениям в течение года значительно изменяются как по сечению, так и во времени;

– полученные размерности (от 10^{-4} до 10^{-6}) в значительно большей степени (по сравнению с общепринятыми) соответствуют химическим представлениям о размерности коэффициента диффузии CO_2 (10^{-4} – в воздухе и $10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ – в воде);

– рассчитанные по существующей методике значения D' по сечению бетона являются переменной величиной как по сечению, так и во времени для бетонов одного состава, хранящихся в одних условиях.

Заключение. Эффективный коэффициент диффузии CO_2 (искусственно введенный для увязывания толщины карбонизированного бетона, определяемого фенолфталеиновым тестом, с параметрами карбонизации) не может быть использован для определения толщины прокарбонизированного бетона, ее изменения во времени по сечению бетона.

Распределение эффективного коэффициента диффузии углекислого газа воздуха по сечению бетона и его изменение во времени не подтверждает справедливость использования 1-го закона Фика для характеристики поведения бетона в процессе его эксплуатации в различных воздушных средах.

1-й закон Фика (с основой на использовании индикаторного теста) не определяет карбонизацию бетона.

Список литературы

1 **Васильев, А. А.** Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : [монография] / А. А. Васильев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.

2 **Алексеев, С. Н.** Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. – М. : Стройиздат, 1976. – 205 с.

3 **Васильев, А. А.** Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) : [монография] / А. А. Васильев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 304 с.

4 **Васильев, А. А.** Оценка существующей модели карбонизации / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2009. – № 1 (22). – С. 54–58.

5 СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / М-во стр.-ва и архитектуры. – Минск, 2003. – 139 с.

Получено 18.11.2014

A. A. Vasilyev. Assessment of use of effective coefficient of diffusion of carbon dioxide of air for concrete carbonization definition.

Results of research of distribution of effective coefficient of diffusion of carbon dioxide of air (D') on concrete section are given at its storage within a year in atmospheric conditions. It is shown that values of D' for one composition of concrete on absolute values within a year considerably change not only in time, but also on the concrete section that doesn't allow to use the 1-st law of Fick (with a basis on application of indicator dough) for an assessment concrete carbonization in actual practice of operation.