

**ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО**

УДК 007.51.519.718

*А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; Л. В. ПЛИКУС, инженер, ПККУП «Институт Гомельстройпроект», г. Гомель*

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ  
УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ВОЗДУХА В КАРБЕНИЗИРОВАННОМ БЕТОНЕ**

Выполнено исследование распределения коэффициента диффузии углекислого газа воздуха по сечению карбенизированного бетона. Полученные результаты показали, что реакция карбенизации бетона определяется не диффузионными процессами, а условиями эксплуатации конструкций.

**П**араболический закон окисления металлов или «закон квадратного корня» впервые был выведен Г. Тамманом в 1920 г. на примере взаимодействия серебра с парами йода [1]. Впоследствии он использовался для обоснования многих процессов, в том числе и карбенизации бетона.

Для вывода основного уравнения карбенизации [2] принимали следующие допущения: падение концентрации  $\text{CO}_2$  в порах бетона линейно. У поверхности бетона концентрация  $\text{CO}_2$  соответствует концентрации его в окружающем воздухе, а в зоне химической реакции равна нулю. Концентрация  $\text{CO}_2$  в отдельных точках по сечению образца при каждом положении фронта карбенизации успевает установиться, поскольку скорость его продвижения и скорость диффузионного перемещения  $\text{CO}_2$  в порах бетона существенно различны. Это означает, что градиент концентрации для небольших отрезков времени является постоянной величиной. Такое допущение позволяет для расчетов толщины карбенизированного слоя использовать уравнение 1-го закона Фика

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

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

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

где  $m_0$  – реакционная емкость бетона – количество  $\text{CO}_2$ , поглощенного единицей объема бетона или объемная концентрация связанного  $\text{CO}_2$ .

Тогда

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

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

После интегрирования

$$\frac{x^2}{2} = \frac{D'(C_0 - C)\tau}{m_0}. \quad (5)$$

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

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

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

Сложность определения  $D'$  состоит в том, что для получения значений  $m_0$  и  $x$  требуются длительные сроки воздействия  $\text{CO}_2$  воздуха на бетон. Поскольку исследования проводились в лабораторных условиях, то концентрация  $\text{CO}_2$  принята 10 и 20 %. И первое, и второе абсолютно не соответствует реальным условиям эксплуатации конструкций. При краткосрочных испытаниях в лабораторных условиях бетонов различных составов были получены значения  $D' = 1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$  [2].

Объектами исследования служили железобетонные конструкции (ЖБК) различных типов, эксплуатировавшиеся разные сроки в различных условиях.

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

### Результаты экспериментов и их обсуждение.

В работах [3–5] было убедительно доказано, что карбонизация по сечению бетона распространяется не фронтально, а по экспоненциальной зависимости (степень карбонизации бетона максимальна в поверхностных слоях). Поэтому было интересно рассчитать эффективный коэффициент диффузии, используя в выражении (6) данные не индикаторного метода, а результаты определения карбонатной составляющей (КС) в пробах бетона, отобранных по сечению конструкций.

Построено значительное количество графиков для ЖБК в зависимости от прочности бетона на сжатие, состава бетона, времени и условий эксплуатации конструкций.

В качестве примера на рисунках 1, 2 представлены результаты исследования бетона колонн, эксплуатировавшихся одинаковые сроки в различных условиях.

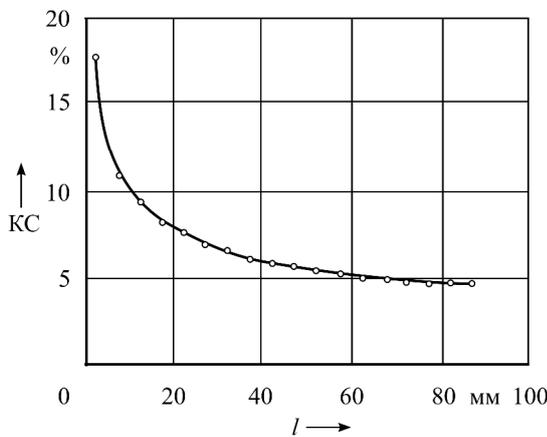


Рисунок 1 – Зависимость  $l - КС$  для колонны формовочного цеха ДСК, эксплуатировавшегося 25 лет

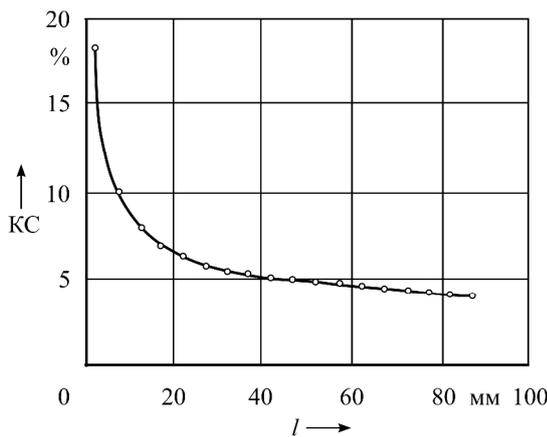


Рисунок 2 – Зависимость  $l - КС$  для колонны свинарника, эксплуатировавшегося 25 лет

На основании данных расчета КС по выражению (6) были рассчитаны значения  $D'$  по сечению колонн. При этом реакцию емкость 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,  $см^3$ ;  $\rho$  – плотность бетона,  $г/см^3$ ; по результатам лабораторного определения принято  $\rho = 2,38 г/см^3$ .

По результатам расчетов построены кривые изменения  $D'$  по сечению исследованных конструкций (рисунки 3 и 4).

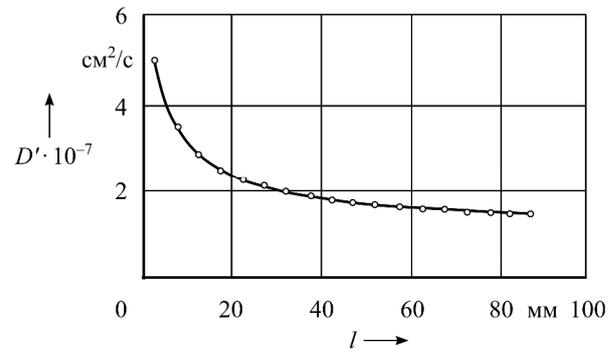


Рисунок 3 – Зависимость  $l - D'$  для колонны формовочного цеха ДСК, эксплуатировавшегося 25 лет

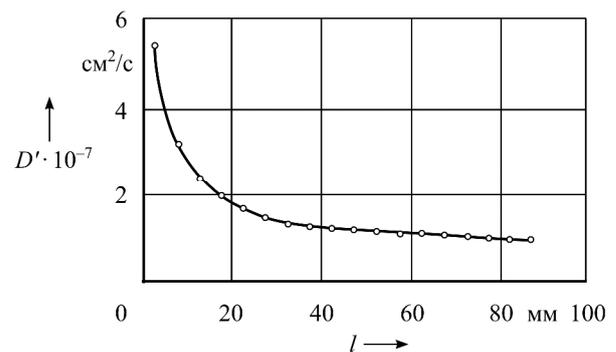


Рисунок 4 – Зависимость  $l - D'$  для колонны свинарника, эксплуатировавшегося 25 лет

Из анализа полученных графиков видно, что:

– характер распределения карбонатов и эффективного коэффициента диффузии по сечению колонн идентичны;

– по сечению колонн величина  $D'$  непостоянна, она изменяется от больших значений на поверхности к меньшим – в глубине бетона, при этом ее наиболее интенсивное изменение наблюдается в поверхностных слоях бетона;

– в глубине бетона там, где практически не сказывается влияние условий эксплуатации (температура, влажность, концентрация  $CO_2$  и т. д.), величины  $D'$  для различных составов бетона близки и составляют  $D' \approx 1 \dots 1,2 \cdot 10^{-7} см^2/с$ .

Результаты экспериментов позволили сделать следующие выводы:

1 Полученные по результатам исследований реально эксплуатируемых ЖБК значения  $D'$  на несколько порядков ниже значений, полученных в лабораторных условиях авторами [2] и в значи-

тельно большей степени соответствуют химическим представлениям о размерности коэффициента диффузии.

2 Рассчитанные по существующей методике значения  $D'$  по сечению реально эксплуатируемых конструкций являются переменной величиной для конструкций из бетона одного состава и эксплуатируемых в одинаковых условиях. Такое распределение  $D'$  не подтверждает справедливость использования 1-го закона Фика для характеристики поведения бетона в процессе эксплуатации конструкций в воздушной среде. 1-й закон Фика (с основой на использовании индикаторного теста) не определяет карбонизацию бетона в реальных условиях эксплуатации.

3 Приведенное выше показывает, что течение реакции карбонизации определяется в первую очередь не диффузионными процессами, а условиями эксплуатации конструкций (влажностью и температурой), изменения которых будут способствовать ускорению возвратно-поступательного перемещения поровой влаги и, соответственно, ускорять реакцию карбонизации. Максимальная скорость карбонизации будет наблюдаться в поверхностных слоях бетона (что подтверждается при анализе распределения карбонатной составляющей по сечению бетона [см. рисунки 1, 2]), контактирующих с воздухом.

Получено 01.10.2008

**A. A. Vasilyev, L. V. Plikus.** Investigation of atmospheric carbon dioxide diffusion coefficient in the carbonized concrete.

It was made investigation of atmospheric carbon dioxide diffusion coefficient distribution according to carbonized concrete cross section. Obtained results have shown that concrete carbonation reaction is not determined by diffusion process but construction exploitation conditions.

С одной стороны, на такой глубине максимально облегчен диффузионный подвод  $\text{CO}_2$  в зону химической реакции, с другой – там наблюдается быстрая смена влаги в капиллярно-поровой структуре бетона в зоне, где происходит химическое взаимодействие  $\text{CO}_2$  с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [6].

#### Список литературы

- 1 **Томашов, Н. Д.** Теория коррозии и защиты металлов / Н. Д. Томашов. – М. : Изд. АН СССР, 1959. – 591 с.
- 2 **Алексеев, С. Н.** Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розеталь. – М. : Стройиздат, 1978. – 205 с.
- 3 Неразрушающие методы оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах : практ. пособие / Т. М. Пецольд [и др.]; под ред. А. А. Васильева; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2007. – 146 с.
- 4 **Васильев, А. А.** Об оценке карбонизации железобетонных конструкций по зависимости распределения карбонатной составляющей от глубины бетона / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа : Наука и транспорт. – 2005. – № 1(10). – С. 37–41.
- 5 **Васильев, А. А.** Оценка и прогнозирование состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, на основе методов pH- и карбометрии / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2006. – № 4(7). – С. 81–88.
- 6 **Васильев, А. А.** Исследование механизма и кинетики карбонизации железобетонных конструкций / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2006. – № 1 (4). – С. 52–57.