



П. А. ФЕДОРОВ

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ CO<sub>2</sub> В МЕЛКОЗЕРНИСТОМ БЕТОНЕ РАЗНОЙ ПЛОТНОСТИ

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINING  
THE EFFECTIVE CO<sub>2</sub> DIFFUSION COEFFICIENT  
IN FINE-GRAINED CONCRETE OF DIFFERENT DENSITIES

*Рассмотрены прямые и косвенные методы определения эффективного коэффициента диффузии CO<sub>2</sub> в бетоне. Описаны особенности диффузионного процесса в капиллярно-пористом теле. По результатам испытаний образцов мелкозернистого бетона с разной плотностью проведён сравнительный анализ значений коэффициентов, полученных основными методами. Критериями для сравнения были приняты зависимость водоцементного отношения от диффузии, а также скорость карбонизации от времени. Установлено наличие значительных отклонений в бетонах низкой проницаемости коэффициентов, полученных методами мембраны 72 % и электропроводности бетона, насыщенного электролитом 85 % в бетоне пониженной проницаемости, от значений, полученных методом карбонизации.*

**Ключевые слова:** диффузия, углекислый газ, эффективный коэффициент диффузии, мелкозернистый бетон, мембрана, электропроводность, карбонизация бетона

Для эксплуатационной среды промышленной зоны, в том числе объектов нефтегазовой отрасли, характерной особенностью является присутствие агрессивных источников. В работе [1] указывается, что в зонах добычи углеводородного сырья одним из наиболее опасных источников является повышенная концентрация CO<sub>2</sub>. Для зоны размещения факельной установки со сложными климатическими условиями, такими как туманы и высокая температура воздуха, концентрация CO<sub>2</sub> может достигать 0,3 %. Например, в работе [2] установлено, что

*Direct and indirect methods for determining the effective diffusion coefficient of CO<sub>2</sub> in concrete are considered. The features of the diffusion process in a capillary-porous body are described. Based on the test results of samples of fine-grained concrete with different densities, a comparative analysis of the coefficients obtained by the main methods was carried out. The criteria for comparison were the dependence of the water-cement ratio on diffusion, as well as the rate of carbonization on time. The presence of significant deviations in the low permeability concretes of the coefficients obtained by the membrane methods of 72 % and the electrical conductivity of concrete saturated with electrolyte 85 % in the low permeability concrete from the values obtained by the carbonization method was established.*

**Keywords:** diffusion, carbon dioxide, effective diffusion coefficient, fine-grained concrete, membrane, electrical conductivity, concrete carbonization

наиболее распространённой причиной коррозии надземных железобетонных конструкций является негерметичность технологического оборудования.

В результате действия CO<sub>2</sub> железобетонные конструкции подвергаются процессу карбонизации. При этом происходит потеря пассивирующих свойств защитного слоя по отношению к стали. Из-за попадания агрессивных элементов в зону стальной арматуры происходит её быстрая коррозия и последующее растрескивание бетона.

Одним из основных параметров, влияющих на кинетику процесса карбонизации, является диффузия  $\text{CO}_2$  в бетоне. В настоящее время нет единого подхода к определению этого параметра, что связано со сложностью физико-химического процесса переноса вещества в капиллярно-пористом теле. Особенно усложняется этот процесс с учётом следующих факторов: химических реакций взаимодействия газа со стенками капилляра, нестационарных температурно-влажностных условий, насыщенности влагой пор и давления газа. Существенную роль играет размер диаметров капилляров. Например, для бетонов особо низкой проницаемости характерны поры с маленьким диаметром. В большей части они возможно заполнены СНС-гелем. В результате происходит дополнительное торможение протекания газа.

Необходимо отметить, что существуют значения эффективных коэффициентов диффузии  $\text{CO}_2$  для бетонов, которые приведены в СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии» в качестве требований к бетону. Эти значения зависят от концентрации газа, толщины защитного слоя и срока службы конструкции. Однако в них отсутствует привязка к плотности бетонов, что затрудняет их применение в производстве.

Поэтому целью работы является выявление области рационального применения методов определения эффективного коэффициента диффузии  $\text{CO}_2$  для мелкозернистых бетонов.

Определение эффективного коэффициента диффузии осуществляют прямыми (метод мембраны, метод послойного химического анализа и др.) и косвенными методами (метод карбонизации бетона, метод электропроводности бетона и др.). Для сравнительного анализа рассмотрим наиболее распространённые методы: метод мембраны; метод карбонизации бетона; метод электропроводности бетона, насыщенного электролитом.

Метод мембраны или метод диафрагмы является традиционным для различных тел. Суть метода – берётся герметичная камера и разделяется на две части перегородкой из контрольного образца. В одну часть подаётся газ, который перемещается во вторую через мембрану под действием концентрации и давления. Основным преимуществом этого метода является изучение физических процессов переноса вещества по классической схеме путём замера концентрации агрессивного вещества в двух частях камеры, а также скорости потока движения газа за определённый промежуток времени. Недостатком метода является то, что при инфильтрации газа через капилляр газ полностью или его часть расходуется на взаимо-

действие со стенками капилляра. В результате происходит образование карбонатных соединений и уплотнение капилляра, затрудняющего прохождение новой порции газа. Для решения данной проблемы применяют подсушивание контрольных образцов. Однако подсушивание может привести к частичному нарушению порового пространства из-за миграции влаги к поверхности образца. Ещё одним недостатком этого метода является наличие избыточного давления, способствующего значительному повышению скорости протекания диффузии и химических реакций. Процесс протекает уже по закону Дарси – контролируется конвективным потоком газа. Это приводит к существенному отличию от процессов, протекающих в естественных условиях.

Частным случаем метода мембраны является использование вместо  $\text{CO}_2$  инертных газов. Например, в качестве инертного газа по отношению к бетону может применяться азот  $\text{N}_2$ . Для снижения давления в конструкции диффузионной камеры в работе [3] была предложена система рециркуляции воздушной системы и контроль давления в каждой из частей камеры. Недостатком метода мембраны с инертным газом является то, что метод не учитывает образование продуктов карбонизации в капилляре, следовательно, происходит искажение полученных значений. Для учёта этого фактора общая пористость бетона после карбонизации определяется разностью между первичной пористостью бетона и объёмом продуктов карбонизации гидратных фаз. Методика расчёта описана в работе [3].

По результатам регрессионного анализа данных, полученных этим методом, в работе [3] была предложена следующая модель:

$$D' = 6,1 \times 10^{-6} \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{air}}{1 - \frac{A}{\rho_A} - \varepsilon_{air}} \right)^3 \left( 1 - \frac{RH}{100} \right)^{2,2}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_c$  – общая пористость бетона после карбонизации;  $\varepsilon_{air}$  – воздухоовлечение бетонной смеси;  $\rho_A$  – средняя плотность заполнителя,  $\text{кг/м}^3$ ;  $A$  – расход заполнителя,  $\text{кг/м}^3$ .

Метод карбонизации бетона основывается на результатах ускоренной карбонизации и нормируется ГОСТ 31383-2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний». Преимущество этого метода заключается в учёте количества  $\text{CO}_2$  на границе твёрдого тела и агрессивной среды, а также количества поглощённого газа стенками твёрдой фазы. Недостатком метода является то, что определение  $D'$  осуществляется по кинетике карбонизации бетона. В настоящее время от-

существует единая модель расчёта этой кинетики. Так, в работах [4–6] определение кинетики карбонизации бетона производится по закону «корня квадратного от времени». Например, в работе [4] предложено определять  $D'$  по результатам измерения глубины карбонизации бетона, окрашенной индикатором фенолфталеина, а именно:

$$D' = \frac{m_0 \cdot x^2}{2 \cdot c_0 \cdot t}, \quad (2)$$

где  $x$  – глубина карбонизации по фенолфталеину, м;  $c_0$  – концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере в долях единицы;  $t$  – срок службы конструкции, с;  $m_0$  – реакционная способность бетона,  $\text{кг/м}^3$ .

В работах [7, 8] по результатам лабораторных, натурных испытаний и численного моделирования установлено, что кинетика карбонизации бетона может описываться по закону «корня  $n$ -степени от времени». При этом прослеживается зависимость  $n$ -степени от плотности бетона [7].

Ещё одним недостатком этого метода является то, что при обследовании эксплуатируемых конструкций практически утрачивается исходная документация по виду и расходу цемента. В результате прогнозирования долговечности этих конструкций инженерам приходится пользоваться справочными данными, которые могут существенно давать большие погрешности, либо проводить анализ структуры тонкими методами, в том числе химическим способом, что достаточно трудоёмко.

При этом реакционная ёмкость определяется по формуле

$$m_0 = 0,4 \cdot f \cdot p \cdot Ц, \quad (3)$$

где  $f$  – степень карбонизации бетона;  $p$  – относительное содержание  $\text{CaO}$  в цементе;  $Ц$  – расход цемента,  $\text{кг/м}^3$ .

Уточнённой моделью определения реакционной ёмкости является модель с учётом известного минералогического состава цемента в бетоне, его содержания и степени гидратации [5]:

$$m_0 = \frac{Ц}{1000} [220\alpha(C_3S + C_2S) + 175\alpha(C_3A + C_4AF)], \quad (4)$$

где  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  – количественный состав основных минералов цемента, %;  $\alpha$  – степень гидратации, в расчётах принято 1.

Метод электропроводности бетона, насыщенного электролитом, основан на определении электропроводности поровой жидкости как электролита в бетоне и последующего определения эффективного коэффициента диффузии в капиллярно-пористом теле при различной влажности [9]. Достоинством этого метода является то, что он позволяет быстро определить сквозную пористость тела с учётом её извилистости. Недостатками метода являются: зависимость точности измерения от наличия блуждающих токов, проходящих по стенкам образца; влияние контактной зоны «бетон-электрод» и «жидкая фаза-электрод», которые чувствительны к измерительной системе; в методиках отсутствуют указания, в какой момент осуществлять измерение сопротивления образца (до карбонизации либо после неё).

Расчёт эффективного коэффициента диффузии в этом методе рекомендуется осуществлять по следующей зависимости [9]:

$$D' = D \left( \frac{R_0}{R_N} - \frac{R_0}{R_w} \right), \quad (5)$$

где  $D$  – молекулярный коэффициент диффузии  $\text{CO}_2$  в воздухе,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $R_0$  – омическое сопротивление жидкой фазы образца, Ом;  $R_N$  – сопротивление образца при полном водонасыщении, Ом;  $R_w$  – сопротивление образца при  $w$ -влажности агрессивной среды, Ом.

### Материалы и методики

С целью получения расчётных параметров зависимостей (1), (2) и (5) были приняты образцы мелкозернистого бетона с разной плотностью. Они изготавливались из порландцемента марки «СЕМ П/А-Ш32,5Б» (ЗАО «Катавский цемент») с содержанием минеральной добавки из доменного шлака 18,5 % и средней плотностью  $3100 \text{ кг/м}^3$ . Химический и минералогический (расчётный) составы клинкера, а также доменного шлака приведены в табл. 1.

В качестве мелкого заполнителя принимался речной кварцевый песок месторождения «Киешкинское» близ станции Уршак (Республика Башкортостан) средней плотностью  $2400 \text{ кг/м}^3$ , модулем крупности  $M_k=2,4$  и содержанием глинистых частиц 0,8 %. Воздухововлечение

Таблица 1

Состав вяжущего вещества и минеральной добавки

Химический состав клинкера, %					Минералогический состав клинкера, %				
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
63,18	20,61	5,61	4,40	1,95	0,25	52,4	19,6	7,3	13,2
Примерный химический состав доменного шлака Магнитогорского металлургического комбината [10]									
SiO <sub>2</sub>		CaO		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		MgO		MnO	
35,7		40,1		14,4		5,5		1,0	
								SO <sub>3</sub>	
								Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
								1,2	
								0,9	

бетонной смеси образцов составило 2 %. Составы образцов мелкозернистого бетона с результатами определения марки по водонепроницаемости, водопоглощению и средней плотности образцов приведены в табл. 2.

По классификации Н.К. Розенталя [11] образцы типов 1 и 2 относятся к бетонам нормальной проницаемости, а бетоны типов 3–6 к пониженной проницаемости.

Определение  $D'$  при методе мембраны осуществлялось аналитическим способом на основе данных по химическому составу клинкера и минеральной добавки (см. табл. 1), а также составов образцов. Методика расчёта [3], ориентированная на цемент типа «СЕМ II», включала в себя: расчёт количества основных гидратных фаз (CH, CSH, CASH, CAFH) цементного камня в бетоне; расчёт первоначальной общей пористости бетона; расчёт пористости бетона, уплотнённого продуктами карбонизации; определение эффективного коэффициента диффузии  $CO_2$ .

Для расчёта эффективного коэффициента диффузии  $CO_2$  по модели (3) были проведены ускоренные испытания карбонизации

образцов размером 40×40×160 мм в среде: концентрация газа 5 % по объёму, относительная влажность 75 %, температура 20 °С. Все грани за исключением нижней покрывались парафином. Период выдержки образцов в камере составил 47 сут (4×10<sup>6</sup> с). Измерение глубины карбонизации осуществлялось с применением индикатора 5 % фенолфталеина по методике, описанной в работе [12]. Результаты сколов образцов с указанием глубины карбонизации приведены на рис. 1.

При расчёте реакционной ёмкости цемента по зависимости (2) значение степени карбонизации бетона принято по ГОСТ 31383-2008. С целью сопоставления коэффициентов диффузии  $CO_2$  при этом методе дополнительно определялась реакционная ёмкость по зависимости (4).

Определение значений  $D'$  для исследуемых образцов по методу электропроводности бетона, насыщенного электролитом, осуществлялось по зависимости (5), с учётом экспериментальных значений сопротивлений жидкой фазы и образцов, полученных по методике [9]. Измерения сопротивлений проводились с по-

Таблица 2

Составы образцов мелкозернистого бетона

Тип состава	Содержание материалов, кг/м <sup>3</sup>			В/Ц	Водопоглощение, %	W	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>
	цемент	песок	вода				
1	453	1480	316	0,70	8,2	2	2114
2	457	1495	297	0,65	6,7	2	2249
3	461	1512	277	0,60	6,1	4	2114
4	467	1527	257	0,55	5,8	4	2205
5	471	1542	237	0,50	4,3	6	2198
6	477	1561	215	0,45	4,0	8	2162

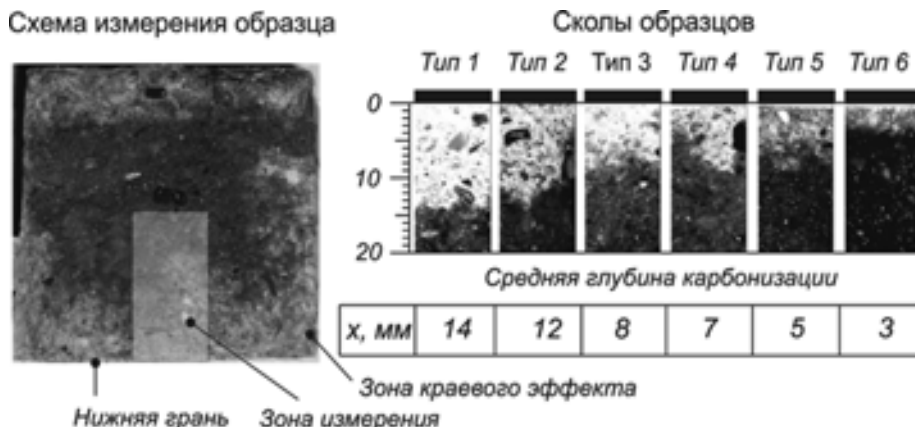


Рис. 1. Сколы контрольных образцов после 45 сут выдержки в среде  $CO_2$  5 % по объёму

мощью моста переменного тока марки «P5058». Electroды размерами 25×25 мм приняты из нержавеющей стали для исключения воздействия коррозионных процессов. Снижение влияния поляризации электродов в цепи с переменным током осуществляется с помощью магазина сопротивлений марки «МСР-63» с установленным сопротивлением 7 кОм. При переменном токе магазин сопротивлений выполняет роль катушки индуктивности, осуществляющей функцию сглаживания помех в цепи. Общий вид установки приведен на рис. 2.

Определение сопротивления жидкой фазы в бетоне осуществлялось на образцах 40×40×40 мм. Эти образцы подвергались ускоренной карбонизации в течение 50 сут. Перед каждым измерением торцы образцов шлифовались, обеспыливались и покрывались в местах контакта с электродом графитовой пастой, а боковые стенки парафином. Для обеспечения плотного контакта электроды прижимались с усилием 0,2–0,3 МПа к образцу с помощью струбины через прокладки из оргстекла. Вначале измерялось сопротивление жидкой фазы в порах бетона при рабочей влажности 75 %. После этого образцы насыщались электролитом до постоянной массы и производилось измерение в насыщенном состоянии.

Для определения удельного сопротивления электролита использовалась водная вытяжка состава 1:10 из дроблёного образца цементного камня 40×40×160 мм с В/Т = 0,5. Водная вытяжка заливалась в полиэтиленовый цилиндр диаметром 10 мм и высотой 35 мм. С помощью моста измерялось сопротивление  $R'_0$ . По результатам измерения осуществлялись расчёты удельного сопротивления электролита и омического сопротивления жидкой фазы в объёме исследуемого образца  $R_0$ .

Удельное сопротивление жидкости в объёме составило 122,1 Ом·см, что коррелирует с работами [9, 11]. В качестве  $D$  в формуле (5) принималось значение  $1,65 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с, которое соответствует диффузии газа в воздухе при температуре 293 К [13].

### Результаты

Результаты определения эффективного коэффициента диффузии  $\text{CO}_2$  в бетоне, полученные разными методами, приведены в виде графика зависимости водоцементного отношения от  $D'$ .

Анализ результатов показал, что рассмотренные методы в целом имеют результат с одной размерностью (рис. 3). Однако существует ряд различий. Так, при сравнении  $D'$ , полученных

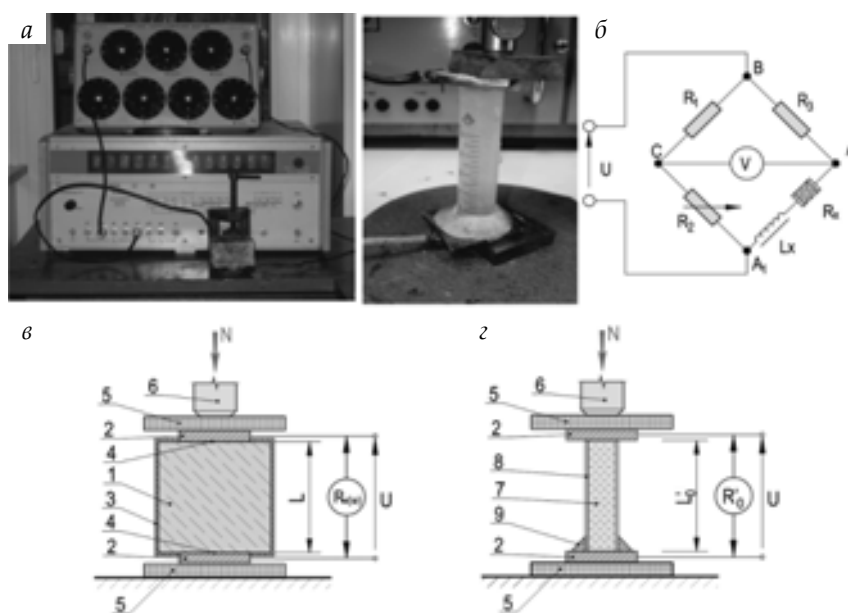


Рис. 2. Установка для испытания образцов методом электропроводности бетонов, насыщенных электролитом: а – общий вид установки; б – мостовая схема подключения образцов; в – схема для измерения сопротивления жидкой фазы в бетоне; г – схема для измерения сопротивления жидкой фазы в объёме; 1 – образец; 2 – титановый электрод; 3 – покрытие из парафина; 4 – слой из графитовой пасты; 5 – прокладка из оргстекла; 6 – головка струбины (пресса); 7 – электролит; 8 – пластиковый цилиндр; 9 – герметик

по модели (2), с разным подходом в определении реакционной ёмкости, для всех марок водонепроницаемости погрешность составляет 13 %. Расхождения между значениями  $D'$  метода электропроводности проницаемости от значений  $D'$  метода карбонизации в бетонах нормальной проницаемости совпадают, а в бетонах низкой проницаемости имеют существенную погрешность 85 %. Аналогичную высокую погрешность 72 % имеет метод мембраны от метода карбонизации.

На рис. 4 приведены графики изменения глубины карбонизации ( $x$ ) от времени ( $T$ ) для типов 3 и 6. Они построены по зависимости (4), так как в настоящее время эта модель нормируется ГОСТ 31383-2008. За рабочую концентрацию принята концентрация  $CO_2$ , равная 0,1 %, соответствующая промышленной зоне.

Для образца типа 3 с В/Ц=0,6 (рис. 4, а) наибольшую скорость карбонизации бетона показывает график, где  $D'$  получено по модели (6), а наименьшее – с  $D'$  по модели (7) и определением реакционной ёмкости по формуле (8). Для типа 6 (В/Ц=0,45) с пониженной проницаемостью (рис. 4, б) наибольшую скорость карбонизации показывает график, эффективный коэффициент диффузии  $CO_2$  которого расчи-

тан по методу электропроводности бетона, насыщенного электролитом.

Полученные результаты со значительными отклонениями в подходах определения эффективного коэффициента  $CO_2$  в бетоне пониженной проницаемости объясняется следующим. При понижении плотности мелкозернистого бетона меняется механизм протекания газа, т. е. переход из воздушной среды в пар, а затем в поровую жидкость и CSH-гель. Это тормозит процесс диффузии. Часть газа может под давлением проскакивать вглубь капилляра на значительное расстояние. Этот процесс зависит от многих факторов, в том числе от сквозной пористости. Метод карбонизации фокусируется на пористости поверхностного слоя (измерение глубины карбонизации по окраске индикатора), в отличие от методов мембраны и электропроводности, учитывающих весь объём образца. Кроме того, существует погрешность самого индикатора. Возможно, метод карбонизации в совокупности с послойным химическим анализом частично коррелирует значения  $D'$ .

Для проницаемых бетонов это различие незначительное, так как в порах присутствует воздушная среда или пар. Следовательно, метод электропроводности является альтерна-

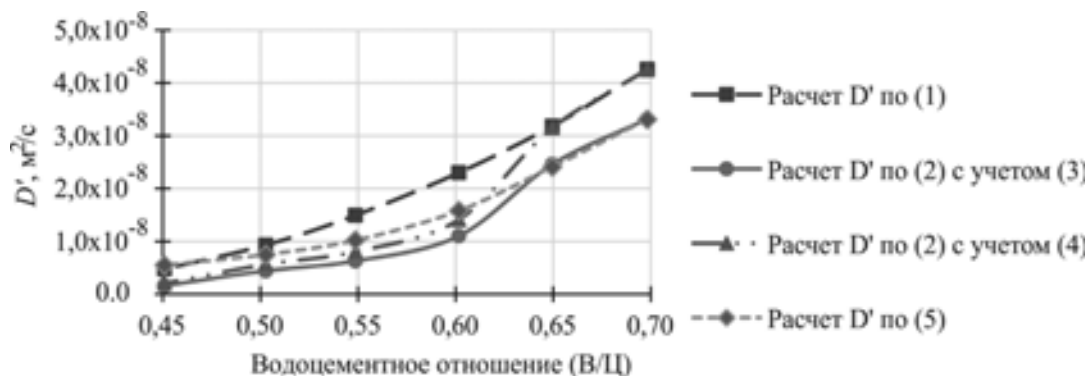


Рис. 3. Изменение  $D'$  от водоцементного отношения

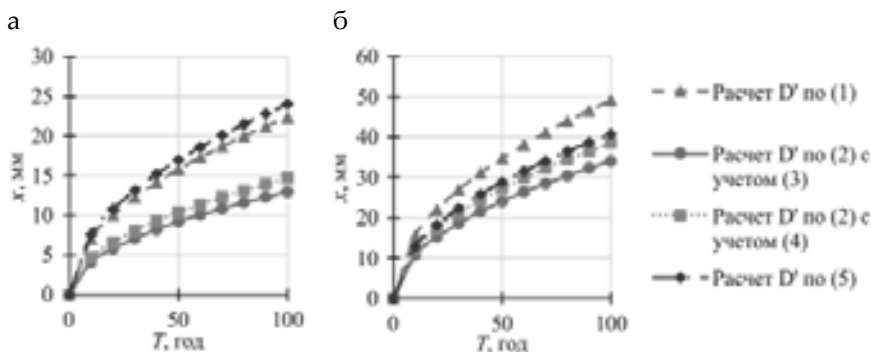


Рис. 4. Зависимость глубины карбонизации ( $x$ ) от времени ( $T$ ): а – для образца типа 3; б – для образца типа 6

тивным методу карбонизации из-за возможности получения данных о структуре образца, особенно о механизме карбонизации в бетонах пониженной и особо низкой проницаемости. Необходимо отметить, что метод мембраны практически коррелирует с результатами метода электропроводности.

**Выводы.** Установлено, что значения  $D'$ , полученные методами электропроводности бетонов и мембраны, имеют значительные расхождения от значений метода карбонизации в бетоне пониженной проницаемости, которые вызваны тем, что последний не учитывает прорыв молекул газа. Метод электропроводности бетона при определении  $D'$  рационально применять на карбонизированных образцах, так как в этом случае будут учитываться продукты химической реакции газа со стенками капилляра. Для исследования диффузионной проницаемости бетонов пониженной и особо низкой проницаемости более рациональны методы мембраны и электропроводности бетона, так как позволяют установить структурные характеристики капиллярно-пористого тела.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федоров П.А., Абдуллин М.М., Абдуллин В.М., Нигматуллин Э.И. Вероятность безотказной работы надводной части нефтедобывающих железобетонных морских стационарных платформ гравитационного типа // Нефтегазовое дело. 2019. Т. 17, № 2. С. 111–120.
2. Полак А.Ф., Гельфман Г.Н., Яковлев В.В. Антикоррозионная защита строительных конструкций на химических и нефтехимических предприятиях. Уфа: Башкирское книжное издательство, 1980. 80 с.
3. Papadakis V.G., Vayennas C.G., Fardis M.N. Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete // ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 2, 1991. pp. 186–196.
4. Алексеев С.Н., Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде. М.: Стройиздат, 1976. 205 с.
5. Новгородский В.И. Основы долговечности железобетонных конструкций. М.: Издательство «Спутник», 2015. 362 с.
6. Gehlen C. Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken: Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Berlin: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2000. 106 pp.
7. Анваров А.Р., Федоров П.А., Латыпова Т.В., Луцык Е.В., Гильмутдинов Т.З., Латыпов Т.В. Кинетика карбонизации мелкозернистого бетона в нормальных температурно-влажностных условиях эксплуатации // VIII Академические чтения РААСН. 2014. С. 12–22.
8. Ming-Te Liang L., Shieng-Min. Mathematical modeling and applications for concrete carbonation //

Journal of Marine Science and Technology, Vol. 11, No. 1, 2001. pp. 20–33.

9. Полак А. Ф., Иванов Ф. М., Яковлев В. В., Кравцов В. М. Метод определения эффективных коэффициентов диффузии агрессивного вещества в жидкой и газовой фазах капиллярно-пористого тела // Строительные конструкции и материалы. Труды НИИ-промстроя. 1977. № 22. С. 121–126.

10. Артамонова А.В., Воронин К.М. Шлакощелочные вяжущие на основе доменных гранулированных шлаков центробежно-ударного измельчения // Цемент и его применение. 2011. № 4. С. 108–113.

11. Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости. М.: ФГУП ЦПП, 2006. 520 с.

12. Fedorov P.A., Anvarov A.R., Lutsyk E.V., Latypov V.M., Latypova T.V. Kinetics of fine concrete carbonation in humid operational environment // International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 11, No. 11, 2016. pp. 7439–7445.

13. Справочник химика: Химическое равновесие и кинетика. Свойства растворов. Электродные процессы. 2-е изд. Т.3 / ред. Б.П. Никольский. М., 1965. 1004 с.

#### REFERENCES

1. Fedorov P.A., Abdullin M.M., Abdullin V.M., Nigmatullin E.I. Probability of no-failure operation of the surface part of oil-containing reinforced concrete marine stationary platforms of gravitational type. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Industry], 2019, V. 17, I. 2, pp. 111-120. (in Russian) DOI 10/17122/ngdelo-2019-2-111-120
2. Polak A.F., Gel'fman G.N., Yakovlev V.V. *Antikorrozionnaya zashchita stroitel'nykh konstruktсий na khimicheskikh i neftekhimicheskikh predpriyatiyakh* [Corrosion protection of building structures at chemical and petrochemical enterprises]. Ufa, Bashkirskoe knizhnoe izdatel'stvo Publ., 1980. 80 p.
3. Papadakis V.G., Vayennas C.G., Fardis M.N. Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete. *ACI Materials Journal*, 1991, V. 88, I. 2, pp. 186-196.
4. Alekseev S.N., Rozental' N.K. *Korrozionnaya stoykost' zhelezobetonnykh konstruktсий v agressivnoy promyshlennoy srede* [Corrosion resistance of reinforced concrete structures in an aggressive industrial environment]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976. 205 p.
5. Novgorodskiy V.I. *Osnovy dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruktсий* [The basics of durability of reinforced concrete structures]. Moscow, Sputnik Publ., 2015. 362 p.
6. Gehlen C. *Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken: Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion*. Diss. [Probabilistic service life assessment of reinforced concrete structures: Reliability considerations for the effective avoidance of reinforcement corrosion. Diss.]. Berlin, 2000. 106 p.

7. Anvarov A.R., Fedorov P.A., Latypova T.V., Lutsyk E.V., Gil'mutdinov T.Z., Latypov T.V. Kinetics of carbonization of fine-grained concrete in normal temperature and humidity conditions. *VIII Akademicheskoe chteniya RAASN* [Academic Readings of RAASN]. Kazan, 2014, pp. 12-22. (in Russian)

8. Ming-Te Liang L., Shieng-Min. Mathematical modeling and applications for concrete carbonation. *Journal of Marine Science and Technology*, 2001, V. 11, I. 1, pp. 20-33.

9. Polak A.F., Ivanov F.M., Yakovlev V.V., Kravtsov V.M. Method for determining the effective diffusion coefficients of an aggressive substance in the liquid and gas phases of a capillary-porous body. *Stroitel'nye konstruksii i materialy. Trudy NIiprostroya* [Building structures and materials. Proceedings of NIiprostroy], 1977, no. 22, pp. 121-126. (in Russian)

10. Artamonova A.V., Voronin K.M. Slag-alkali binders based on blast furnace granulated slags of centrifugal impact grinding. *Tsement i ego primenenie* [Cement and its Application], 2011, no. 4, pp. 108-113. (in Russian)

11. Rozental' N.K. *Korroziionnaya stoykost' tsementnykh betonov nizkoy i osobo nizkoy pronitsaemosti* [Corrosion resistance of low and extremely low permeability cement concrete]. Moscow, FGUP TsPP Publ., 2006. 520 p.

12. Fedorov P.A., Anvarov A.R., Lutsyk E.V., Latypov V.M., Latypova T.V. Kinetics of fine concrete carbonation in humid operational environment. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, V. 11, I. 11, pp. 7439-7445.

13. Nikol'skiy B.P. *Spravochnik khimika: Khimicheskoe ravновесие i kinetika. Svoystva rastvorov. Elektroodnye protsessy. 2-e izd. T. 3.* [Chemistry Handbook: Chemical Equilibrium and Kinetics. Properties of solutions. Electrode processes. 2nd ed. Vol. 3]. Moscow, 1965. 1004 p.

Об авторе:

**ФЕДОРОВ Павел Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций  
Уфимский государственный нефтяной технический университет  
Архитектурно-строительный институт  
450062, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа,  
ул. Космонавтов, 1  
E-mail: fpa\_idpo@mail.ru

**FEDOROV Pavel A.**

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Building Structures Chair  
Ufa State Petroleum Technological University  
Institute of Architecture and Civil Engineering  
450062, Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa,  
Kosmonavtov Street, 1  
E-mail: fpa\_idpo@mail.ru

Для цитирования: Федоров П.А. Сравнительный анализ методов определения эффективного коэффициента диффузии  $\text{CO}_2$  в мелкозернистом бетоне разной плотности // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10, № 1. С. 63–70. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.01.9.

For citation: Fedorov P.A. Comparative analysis of methods for determining the effective  $\text{CO}_2$  diffusion coefficient in fine-grained concrete of different densities. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2020, Vol. 10, no. 1, Pp. 63–70. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2020.01.9.