

УДК 691:544.72

Е.В. КОРОЛЕВ¹, д-р техн. наук (korolev@nocnt.ru), директор Научно-образовательного центра «Наноматериалы и нанотехнологии», А.Н. ГРИШИНА¹, канд. техн. наук (grishinaAN@mgsu.ru), М.И. ВДОВИН¹, инженер; А.И. АЛЬБАКАСОВ², канд. техн. наук

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)
² Оренбургский государственный университет (460018, г. Оренбург, просп. Победы, 13)

Метод анализа кинетики поглощения. Часть 1. Теоретические основы

Статья является первой из серии работ, посвященных теоретическому и экспериментальному анализу процесса поглощения жидкости строительными материалами. Рассмотрены теоретические вопросы описания кинетики поглощения среды пористо-капиллярным телом, освещаются вопросы, посвященные выбору модели пористо-капиллярного тела, влиянию геометрических параметров порового пространства, поверхностных явлений, геометрических размеров и формы образца и др.

Ключевые слова: кинетика поглощения, модель пористо-капиллярного тела.

E.V. KOROLEV¹, Doctor of Sciences (Engineering) (korolev@nocnt.ru), Director Research and Education Center «Nanomaterials and Nanotechnology», A.N. GRISHINA¹, Candidate of Sciences (Engineering) (grishinaAN@mgsu.ru), M.I. VDOVIN¹, Engineer; A.I. AL'BAKASOV², Candidate of Sciences (Engineering)
¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl'skoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)
² Orenburg State University (13, Avenue Pobedi, Orenburg, 460018, Russian Federation)

Method for Analysis of Absorption Kinetics. Part 1. Theoretical Basis

The article is one of a series of works devoted to the theoretical and experimental analysis of the process of liquid absorption by building materials. Theoretical problems of the description of the medium absorption by the porous-capillary body are considered: issues devoted to the selection of a model of porous-capillary body, the influence of geometric parameters of the pore space, surface phenomena, geometric sizes and forms of a sample etc. are highlighted.

Keywords: absorption kinetics, model of porous-capillary body.

Процесс поглощения жидкости строительным материалом, имеющим пористо-капиллярную структуру (далее для сохранения общности описания – пористо-капиллярное тело; жидкость – среда), является многостадийным, состоящим из быстрой стадии, которая определяется геометрическими характеристиками порового пространства (длиной и радиусами капилляров), поверхностными явлениями (смачиваемостью пористо-капиллярного тела средой; величиной поверхностного натяжения среды) и вязкостью среды, а также медленной стадии – диффузионного перемещения молекул среды в веществе плотного каркаса пористо-капиллярного тела. Наличие медленной стадии определяется особенностями строения вещества, из которого состоит пористо-капиллярное тело. Часто наличие аморфной фазы обуславливает протекание медленной стадии, однако, как правило, при анализе кинетики поглощения она не учитывается.

Исследование поглощения среды пористо-капиллярным телом в строительном материаловедении относится к рутинным испытаниям, по результатам которых можно установить общие корреляционные зависимости прочности, морозостойкости, химической стойкости и других свойств, зависящих от параметров структуры, от пористости. Такие корреляционные зависимости позволяют для исследуемого композитного материала произвести качественный прогноз его долговечности, часто невысокой достоверности.

По кинетике поглощения возможно определить геометрические характеристики порового пространства пористо-капиллярного тела, в частности такой способ предложен в [1]. Характеристики (в частности, коэффициент диффузии), рассчитываемые по кинетическим зависимостям поглощения различных сред (например, по методикам, изложенным в [2]), используются при прогнозировании несущей способности строительных конструкций [3] или свойств материала [4]. Однако в указанных работах не устанавливается правомочность применения термина «коэффициент диффузии». Далее проведем анализ, на основании которого определим

модель пористо-капиллярного тела, а также влияние очевидных факторов на кинетику поглощения среды.

Анализ и модель пористо-капиллярного тела

В работе [1] предложено дифференциальное уравнение, описывающее движение жидкости в цилиндрическом капилляре (при $T = \text{const}$):

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{1}{x} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \frac{8\eta}{r^2\rho} \left(\frac{dx}{dt} \right) - \frac{2}{x} \frac{\sigma}{r_m\rho} + g \sin(\beta) = 0, \quad (1)$$

где x – длина столбика среды в капилляре; t – время движения среды по капилляру; r – радиус капилляра; η – коэффициент динамической вязкости среды; ρ – плотность среды; g – ускорение свободного падения; r_m – радиус мениска среды в капилляре; σ – поверхностное натяжение среды; β – угол наклона оси капилляра к горизонту.

Уравнение (1) не имеет точного решения. Простой элементарной функцией, которая с достаточной точностью описывает решение указанного дифференциального уравнения, является:

$$x_t = x_{\max}(1 - e^{-\lambda t}). \quad (2)$$

Из этого решения предлагается уравнение для совокупности монокапилляров, которые пронизывают пористо-капиллярное тело [1]:

$$V_t = V_{\max}(1 - e^{-\lambda t}); \quad (3)$$

где V_t – объем поглощенной среды.

Далее (3) преобразуется к виду [1]:

$$W_t = W_{\max}(1 - e^{-\bar{\lambda} t^\alpha}) \quad \text{или} \quad W_t = W_{\max}(1 - e^{-(\bar{\lambda} t)^\alpha}); \quad (4)$$

где $\bar{\lambda}$ – величина, характеризующая некоторый средний размер капилляров модельного поликапиллярного пористо-капиллярного тела; α – коэффициент, характеризующий однородность размеров капилляров.

При очевидности предложенного уравнения движения среды в капилляре (1), его решений и адаптированных уравнений (2) – (4) применение дифференциально-

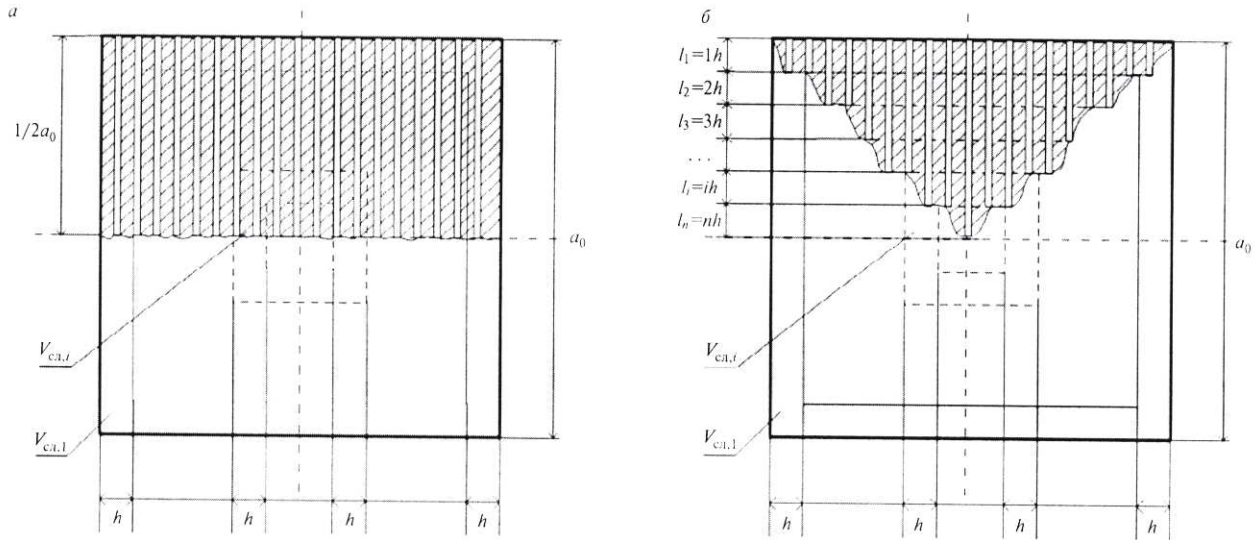


Рис. 1. Типы моделей пористо-капиллярного тела: а – тело, состоящее из монокапилляров, имеющих длину, сопоставимую с 1/2 его линейного размера; б – тело, поровое пространство которого представлено капиллярами, имеющими длину, кратную толщине слоя h

го уравнения (1) для объемного тела применимо только в общем, так как модель пористо-капиллярного тела, состоящего из монокапилляров, имеющих длину, сопоставимую с 1/2 линейного размера тела (принимается, что x_{\max} из уравнения (2) равна 1/2 линейного размера тела), является некорректной (рис. 1, а). Указанное следует из элементарного анализа. Предположим, что тело, поровое пространство которого представлено монокапиллярами, имеет равномерно распределенную пористость (плотность воздушных включений (капилляров) ρ_n постоянна). Каждый слой, выделенный в таком теле, будет иметь объем, занятый капиллярами, равный:

$$v_{n,i} = \rho_n ([a_0 - 2h(i-1)]^3 - [a_0 - 2hi]^3), \quad (5)$$

и количество капилляров $N_{k,i}$:

$$N_{k,i} = \frac{v_{n,i}}{2\pi r^2 h}, \quad (6)$$

где a_0 – размер грани тела кубической формы; r – радиус капилляра; h – толщина выделенного слоя (причем $h \ll 1/2a_0$); i – номер слоя.

Анализ (5) показывает, что v_n уменьшается с постоянной скоростью, равной:

$$\frac{dv_{n,i}}{di} = -24\rho_n h^2 (a_0 - 2hi + h), \quad (7)$$

свидетельствующей о линейном уменьшении объемов последующих слоев. Аналогично уменьшается количество капилляров. Отсюда очевидно, что количество капилляров, имеющих длину, равную $1/2a_0$, незначительно:

$$N_{k,\min} = \frac{\rho_n h^2}{2\pi r^2}. \quad (8)$$

Следовательно, переход от уравнения (2) к (3) некорректен, а решение (2) неприменимо для объемного пористо-капиллярного тела.

Правомерно представление пористо-капиллярного тела, поровое пространство которого представлено капиллярами, имеющими длину, кратную толщине слоя h (рис. 1, б). Причем количество капилляров с длиной $l_{k,i} = ih$ уменьшается согласно зависимости (6), т. е. количество капилляров максимально на границе тела и минимально в слоях, близко расположенных к его центру. Соотношение максимального и минимального количества капилляров $N_{k,\max}/N_{k,\min}$ равно:

$$\frac{N_{k,\max}}{N_{k,\min}} = \frac{a_0^3 - [a_0 - 2h]^3}{h^3}. \quad (9)$$

При предположении линейной скорости заполнения слоев пористо-капиллярного тела средой, с которой оно контактирует, т. е. $i=kt$ (здесь k – коэффициент пропорциональности; t – время), получим кинетику поглощения среды телом. На момент времени $t=t^*$ объем поглощенной среды равен:

$$v_{s,t} = \sum_{i=1}^{i=kt^*} v_{n,i} = \rho_n \sum_{i=1}^{i=kt^*} ([a_0 - 2h(i-1)]^3 - [a_0 - 2hi]^3), \quad (10)$$

а поглощение по объему и по массе соответственно:

$$W_{o,t} = \frac{\rho_n}{a_0^3} \sum_{i=1}^{i=kt^*} ([a_0 - 2h(i-1)]^3 - [a_0 - 2hi]^3); \quad (11)$$

$$W_{m,t} = \rho_m \frac{\rho_n}{a_0^3} \sum_{i=1}^{i=kt^*} ([a_0 - 2h(i-1)]^3 - [a_0 - 2hi]^3) \text{ или } W_{m,t} = \rho_m W_{o,t}, \quad (12)$$

где ρ_m – средняя плотность пористо-капиллярного тела.

При $i=a_0/2h$ поглощение среды пористо-капиллярным телом максимально и равно соответственно:

$$W_{o,\max} = \rho_n \text{ и } W_{m,\max} = \rho_m \rho_n. \quad (13)$$

Отсюда физический смысл ρ_n соответствует объемной доле порового пространства пористо-капиллярного тела, способного к поглощению среды (открытой пористости).

Таким образом, работоспособной моделью пористо-капиллярного тела является модель, представляющая поровое пространство пористо-капиллярного тела системой капилляров различной длины, кратной h (рис. 1, б). Важным является также заключение о неприменимости использования параметров $\bar{\lambda}$ и α для описания геометрических параметров порового пространства пористо-капиллярных тел.

Размер и форма пористо-капиллярного тела

Для определения влияния размера образца пористо-капиллярного тела весьма удобной является величина, вычисляемая как соотношение площади поверхности, через которую происходит поглощение среды пористо-капиллярным телом, к его объему:

$$m_S = \frac{S_n}{V_0} = \frac{6}{a_0}. \quad (14)$$

Указанная величина в технической литературе получила наименование модуля поверхности с единицей измерения $[m^{-1}]$. Из (14) следует, что увеличение a_0 приводит к уменьшению m_S и, как следствие, к снижению величины поглощения:

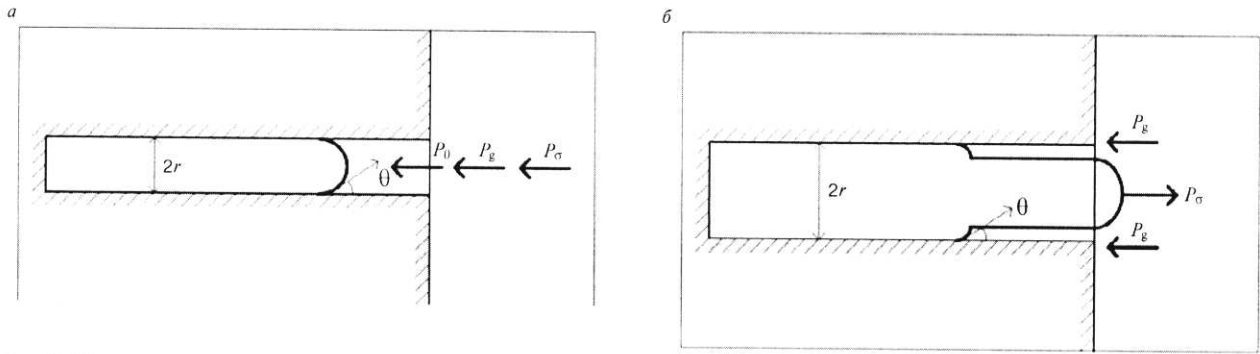


Рис. 2. Модель замкнутого капилляра: а – малых размеров; б – крупных размеров

$$\frac{dW_o}{da_0} = -\frac{6\rho_n h(a_0 - 2h)^2}{a_0^4} \quad (15)$$

Отсюда очевидно, что крупноразмерные изделия должны демонстрировать более высокую стойкость к эксплуатационным факторам, связанным с негативным влиянием поглощенной среды.

Для оценки влияния формы образца выражение (14) для m_S запишем в общем виде:

$$m_S = \frac{k_f}{a_0} \quad (16)$$

где k_f – коэффициент формы, равный:

$$k_f = k_S/k_V \quad (17)$$

где $k_S = S_n/a_0^2$; $k_V = V_0/a_0^3$ (например, для куба: $k_S=6$; $k_V=1$; для цилиндра (с $R=a_0$ и $H=a_0/\pi$): $k_S=2(\pi+1)$; $k_V=1$), а поглощение по объему как функцию, зависящую от m_S :

$$W_o = \rho_n - \rho_n \left(1 - \frac{2h}{k_f} m_S\right)^3 \quad (18)$$

Из формулы (18) следует, что при $2h/k_f = \text{const}$ с возрастанием m_S (до $m_S = k_f/2h$) увеличивается W_o со скоростью, равной:

$$\frac{dW_o}{dm_S} = \frac{6h}{k_f} \rho_n \left(1 - \frac{2h}{k_f} m_S\right)^2 \quad (19)$$

При $m_S = k_f/2h$ величина $\frac{dW_o}{dm_S} = 0$. Это означает, что при достижении определенной глубины процесс поглощения среды пористо-капиллярным телом остановится. Нетрудно показать, что это произойдет при глубине проникновения среды в пористо-капиллярное тело, равной:

$$h = \frac{k_f}{2m_S} = a_0/2 \quad (20)$$

Таким образом, при $V_0 = \text{const}$ увеличение S_n приводит к возрастанию m_S , а следовательно, к росту W_o . На практике это означает, что при равных объемах образцов поглощение среды образцами пористо-капиллярного тела цилиндрической формы будет более интенсивным, чем образцами кубической формы. Дополнительного ускорения процесса поглощения среды можно добиться удалением центральной части образцов любой формы.

Минимальное поглощение

При погружении пористо-капиллярного тела в среду заполнение порового пространства затруднено вследствие необходимости преодоления давления Лапласа, создаваемого средой в капилляре (рис. 2, а), и/или пузырьком воздуха (рис. 2, б). Однако даже при условии такой замкнутости порового пространства поглощение среды будет осуществляться.

Объем поглощенной среды (минимальное поглощение) зависит как от особенностей порового пространства пористо-капиллярного тела, свойств среды и ее поверхностного взаимодействия с веществом тела, так и от условий поглощения.

Для капилляров малых размеров (рис. 2, а) величина поглощения $W_{o,\text{min}}$ определяется установлением равновесия между давлением, возникающим при сжатии газа, находящегося в капилляре P_{ag} , и давлением от действия поверхностных сил P_o и гидростатического давления P_g :

$$W_{o,\text{min}} = \rho_n \left(\frac{P_o + P_g}{P_o + P_g + P_o} \right) \quad (21)$$

где $P_o = \frac{2\sigma}{r} \cos(\theta)$; $P_g = \rho_c gH$; P_o – атмосферное давление; σ – поверхностное натяжение среды; θ – краевой угол смачивания средой вещества пористо-капиллярного тела; ρ_c – плотность среды; H – глубина погружения пористо-капиллярного тела в среду; g – ускорение свободного падения.

Для крупных капилляров (рис. 2, б), в которые среда затекает (т. е. действием поверхностных сил можно пренебречь), величина поглощения $W_{o,\text{max}}$ определяется равенством между гидростатическим давлением и давлением Лапласа для воздушного пузырька:

$$\rho_c gH = \frac{2\sigma}{R} \quad (22)$$

здесь R – радиус пузырька газа:

$$W_{o,\text{max}} = \frac{4}{3} \frac{\pi}{a_0^3} \left(\frac{2\sigma}{\rho_c gH} \right)^3 \quad (23)$$

Величина $W_{o,\text{max}}$ имеет весьма малые значения; основной вклад вносит $W_{o,\text{min}}$ (рис. 3).

Как видно из рис. 3, степень заполнения порового пространства средой $W_{o,\text{min}}/\rho_n$ может достигать значений, близких к 100% (при радиусах капилляров $r < 100$ нм и краевом угле смачивания $\theta < 10^\circ$). Существенный рост степени заполнения наблюдается при радиусах капилляров $r < 1$ мкм и может достигать значения, близкого к 60%; при краевом угле смачивания $\theta > 90^\circ$ величина $W_{o,\text{min}}/\rho_n \rightarrow 0$ при любых значениях r .

Таким образом, даже при условии наличия замкнутых капилляров поглощение среды пористо-капиллярным телом будет осуществляться. Однако степень использования порового пространства тела зависит в основном от геометрических характеристик капилляров, смачиваемости вещества пористо-капиллярного тела, свойств среды и условий эксплуатации тела. При определенных условиях степень заполнения порового пространства средой может достигать значений, близких к 100%.

Причины торможения поглощения

Возникновение сил сопротивления приводит к торможению процесса поглощения среды пористо-капиллярным телом. На кинетических зависимостях протека-

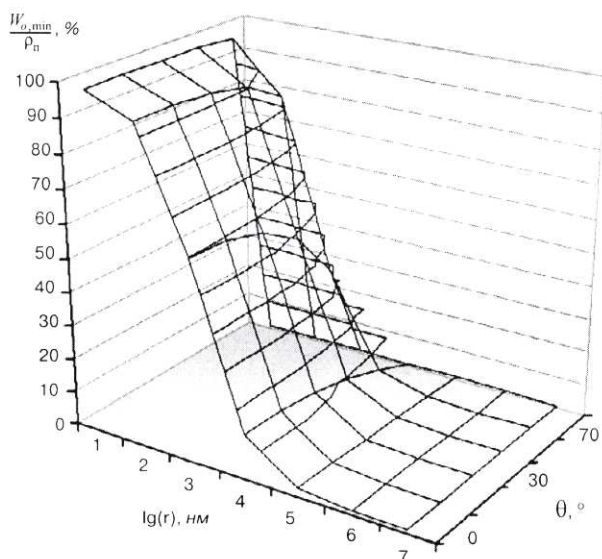


Рис. 3. Степень заполнения порового пространства

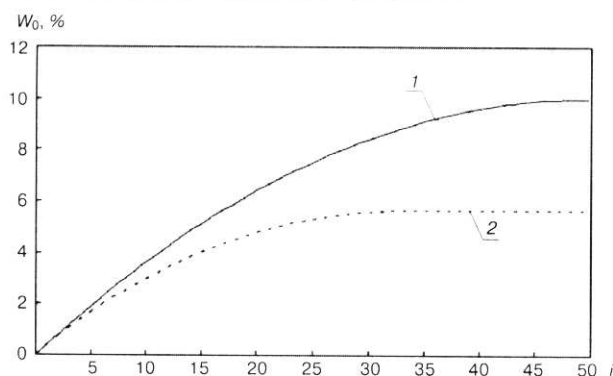


Рис. 4. Кинетика поглощения среды пористо-капиллярным телом без (кривая 1) и с наличием процесса торможения (кривая 2)

ние процесса торможения закономерно отражается снижением уровня поглощения (рис. 4).

Вероятной причиной этого процесса является изменение величины поверхностного натяжения среды вследствие растворения газа. Величина растворенного газа определяется законом Генри [5]:

$$V_r = kV_c \frac{P}{P_0} \quad \text{или} \quad V_r = kV_c \left(\frac{P_a + P_g + P_o}{P_0} \right), \quad (24)$$

где V_r – объем растворенного газа; V_c – объем среды; k – коэффициент растворимости газа.

Из ф. (24) следует, что объем растворенного газа пропорционален давлению, которое, как было показано ранее, зависит от радиуса капилляра (рис. 3). Растворение газа приводит к снижению поверхностного натяжения вследствие адсорбции газа на границе раздела фаз газ – среда [6]:

$$\Gamma = - \frac{c}{RT} \frac{d\sigma}{dc}, \quad (25)$$

где Γ – величина адсорбции; T – температура; R – универсальная газовая постоянная; c – концентрация растворенного вещества (газа); $d\sigma/dc$ – скорость изменения поверхностного натяжения при растворении вещества в среде.

При прочих равных условиях наличие зависимости растворимости газа от радиуса капилляра предопределяет изменение поверхностного натяжения по закону, близкому к логарифмическому. Однако при этом сохраняется приоритетность поглощения среды капиллярами малых размеров.

Другой причиной, обеспечивающей торможение процесса поглощения, является наличие растворимых компонентов. Градиент концентрации растворенного вещества формирует его поток J , направленный на выравнивание концентрации (закономерно, наружу пористо-капиллярного тела):

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (26)$$

где D – коэффициент диффузии.

Представленный перечень причин, вероятно, не является полным. Аналитическое установление их совокупного влияния, к сожалению, затруднено. Поэтому для практических целей необходимо применение апостериорных данных, методика анализа которых будет представлена в следующих работах.

Проверка адекватности модели пористо-капиллярного тела

В соответствии с предложенной моделью количество капилляров, имеющих длину, сопоставимую с характерным размером образца, незначительно (см. ф. (9)). Отсюда закономерно ожидать малые величины коэффициента фильтрации и долю площади, занимаемую такими капиллярами. Для проверки используем экспериментальные данные, представленные в [7]. Коэффициент фильтрации определяется по формуле [7]:

$$k = \eta \frac{Vh}{S\Delta P t}, \quad (27)$$

где V – объем фильтрата; h , S – толщина и площадь образца; t – продолжительность испытания; ΔP – перепад давления.

При предположении о том, что фильтрация осуществляется только через капилляры, имеющие длину, сопоставимую с толщиной образца, в соответствии с законом Пуазейля доля площади образца, занимаемая такими капиллярами, равна:

$$\delta_s = \eta \sqrt{8\pi \frac{k}{S}}, \quad (28)$$

а доля объема таких капилляров, от общего объема капилляров V_n –

$$\delta_v = \frac{\eta}{\Pi_k} \sqrt{8\pi \frac{k}{S}} \quad \text{или} \quad \delta_v = \frac{\delta_s}{\Pi_k},$$

где Π_k – капиллярная пористость, взятая из [8]; $V_n = \Pi_k S h$. Экспериментальные данные по составам бетона и его свойствам [7], а также расчетные значения δ_s и δ_v представлены в таблице.

Из представленной таблицы видно, что значения величин δ_s и δ_v незначительны, что является подтверждением адекватности предложенной модели пористо-капиллярного тела.

Заключение

1. Адекватной моделью пористо-капиллярного тела является модель тела, поровое пространство которого представлено капиллярами, имеющими длину, кратную толщине слоя h . Причем толщина слоя h может рассматриваться как некоторое расстояние, пройденное средой за единицу времени. Кроме того, такая модель имеет закономерную симметрию по распределению капилляров относительно центра пористо-капиллярного тела. Параметры $\bar{\lambda}$ и α модели пористо-капиллярного тела, предложенной [1], не характеризуют поровое пространство пористо-капиллярного тела, так как такая модель является неверной.

2. В соответствии с предложенной моделью поглощение среды пористо-капиллярным телом будет замедляться вследствие закономерного уменьшения объема

Экспериментальные данные [7]				Расчетные значения	
Параметры состава бетона		Свойства бетона		$\delta_s, \%$	$\delta_v, \%$
В/Ц	Ц, кг/м ³	$\bar{k}, \text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{МПа})$	W		
0,61	310	$1,36 \cdot 10^{-08}$	2	0,058	0,23
0,56	330	$4,55 \cdot 10^{-09}$	4	0,034	0,17
0,5	375	$1,31 \cdot 10^{-09}$	6	0,018	0,11
0,4	430	$3,31 \cdot 10^{-10}$	8	0,009	0,3
0,38	450	$4 \cdot 10^{-11}$	12	0,003	0,63

Примечания: Ц – расход цемента; W – марка по водонепроницаемости; \bar{k} – усредненные значения коэффициента фильтрации.

слов по мере приближения к центру тела и, как следствие, уменьшения числа капилляров, способных к поглощению среды. На величину поглощения влияние оказывают форма и размер пористо-капиллярного тела. Увеличение характерного размера образца пористо-капиллярного тела при условии уменьшения модуля поверхности приводит к закономерному уменьшению величины поглощения. Аналогично влияет форма образца: при условии увеличения площади контакта со средой (модуль поверхности возрастает) будет наблюдаться повышение величины поглощения среды пористо-капиллярным телом. На практике указанного можно добиться: при неизменении формы образца (например, куба) высверливанием центральной части или формованием образца, имеющего удаляемую вставку в центральной его части; применением образцов других форм, например заменой образцов кубической формы на образцы цилиндрической формы. Причем одновременное изменение формы и уменьшение характерных размеров должны приводить к существенному увеличению величины поглощения.

3. Движущей силой процесса поглощения являются гидростатическое давление и давление Лапласа. Процесс поглощения среды пористо-капиллярным телом, состоящим из капилляров, не сообщающихся с другими капиллярами и имеющих открытой только одну сторону, будет протекать до момента установления равновесия между давлением газа, находящегося в капилляре, и внешним давлением среды, которое создается гидростатическим давлением и давлением Лапласа. Для малых капилляров ведущее значение будет иметь давление Лапласа, а для крупных капилляров – гидростатическое давление. Модельные расчеты показывают, что при обеспечении хорошего смачивания средой пористо-капиллярного тела, имеющего капилляры с радиусом менее 100 нм, степень заполнения порового пространства средой может быть близкой к 100%. Достаточно высокие показатели заполнения порового пространства (на уровне 60%) реализуются при размерах капилляров менее 1 мкм. Необходимо отметить, что даже при отсутствии смачивания наблюдается некоторое минимальное поглощение, обеспечиваемое гидростатическим давлением.

4. Возникновение внешнего давления обеспечивает поглощение среды таким пористо-капиллярным телом и одновременно является фактором, обеспечивающим торможение процесса поглощения. Основной причиной указанного является снижение величины основной силовой величины в давлении Лапласа – поверхностного натяжения: при повышении давления газ, содержащийся в капилляре, начинает растворяться в среде и таким образом снижать поверхностное натяжение. Другим фактором торможения является наличие в веществе пористо-капиллярного тела растворимых соединений. Таким образом, в пористо-капиллярном теле, поровое пространство которого представлено несообщающимися капиллярами и имеющем открытой только

одну сторону, возникает состояние равновесия, при котором продвижение среды практически останавливается не по причине достижения центра тела, а вследствие установления механического равновесия между контактирующими фазами. Установление такого равновесия до момента достижения полного насыщения средой пористо-капиллярного тела вызывает необходимость решения ряда методологических задач как по отдельным испытаниям строительных материалов воздействию различных сред (водостойкость и/или химическая стойкость) и/или совместному дополнительно влиянию физических факторов (например, морозостойкость), так и по прогнозу их долговечности.

Список литературы

1. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. 344 с.
2. Соломатов В.И., Селяев В.П. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов. М.: Стройиздат, 1987. 260 с.
3. Селяев В.П., Соломатов В.И., Ошкина Л.М. Химическое сопротивление наполненных цементных композитов. Саранск: Издательство Мордовского университета, 2001. 152 с.
4. Бабков В.В., Мохов В.Н., Капитанов С.М., Комохов П.Г. Структурообразование и разрушение цементных бетонов. Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. 376 с.
5. Кнорре Д.Г., Крылова Л.Ф., Музыкантов В.С. Физическая химия. М.: Высшая школа, 1990. 416 с.
6. Айвазов Б.В. Практикум по химии поверхностных явлений и адсорбции. М.: Высшая школа, 1973. 208 с.
7. Повышение стойкости бетона и железобетона при воздействии агрессивных сред / Под ред. В.М. Москвина и Ю.А. Саввиной. М.: Стройиздат, 1975. 236 с.
8. Долговечность железобетона в агрессивных средах. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.

References

1. Sheikin A.E., Chekhovskiy Yu.V., Brusser M.I. Struktura i svoystva tsementnykh betonov [Structure and properties of cement concrete]. Moscow: Stroyizdat. 1979. 344 p.
2. Solomatov V.I., Selyaev V.P. Khimicheskoe soprotivlenie kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov [Chemical resistance of composite construction materials]. Moscow: Stroyizdat. 1987. 260 p.
3. Selyaev V.P., Solomatov V.I., Oshkina L.M. Khimicheskoe soprotivlenie napolnennykh tsementnykh kompozitov [Chemical resistance of the filled cement composites]. Saransk: Izdatel'stvo Mordivskogo universiteta. 2001. 152 p.
4. Babkov V.V., Mokhov V.N., Kapitanov S.M., Komokhov P.G. Strukturoobrazovanie i razrushenie tsementnykh betonov [Structurization and destruction of cement concrete]. Ufa: GUP «Ufimskiy poligrafkombinat». 2002. 376 p.
5. Knorre D.G., Krylova L.F., Muzykantov V.S. Fizicheskaya khimiya [Physical chemistry]. M.: Vysshaya shkola. 1990. 416 p.
6. Aivazov B.V. Praktikum po khimii poverkhnostnykh yavlenii i adsorbtsii [Workshop on chemistry of the superficial phenomena and adsorption]. M.: Vysshaya shkola. 1973. 208 p.
7. Povyshenie stoikosti betona i zhelezobetona pri vozdeistvii agressivnykh sred [Increase of firmness of concrete and reinforced concrete at influence of hostile environment]. Ed. by V.M. Moskvina and Yu.A. Savvina. Moscow: Stroyizdat. 1975. 236 p.
8. Alekseev S.N., Ivanov F.M., Modry S., Shissl' P. Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnykh sredakh [Durability of reinforced concrete in hostile environment]. Moscow: Stroyizdat. 1990. 320 p.