

**Таблица 2.** Целесообразные габариты ванн для физкультурно-оздоровительных занятий

Виды	Параметры ванн (м)	Возрастные группы (лет)	
		7-13	Все остальные
Оздоровительное плавание	длина ширина глубина	25* дорожка 1,9-2,5 0,8-1,1	25* дорожка 1,9-2,5 1,2-1,4
Обучение плаванию	длина ширина глубина	12,5* 6,0 0,6-1,0	25* 6,0 1,0-1,2
Игры в воде	длина ширина глубина	произвольная произвольная 0,8-1,0	произвольная произвольная 1,0-1,4
Прикладные виды плавания	длина ширина глубина	12,5;25 произвольная 0,8-1,5	25 произвольная 1,2-2,0
Общеразвивающие упражнения в воде	длина ширина глубина	произвольная произвольная 0,8-1,0	произвольная произвольная 1,0-1,4
Купание	длина ширина глубина	произвольная произвольная 0,8-1,0	произвольная произвольная 1,0-1,4

К третьей группе относятся помещения связанные непосредственно с функционированием комплекса (насосная, лаборатория, венткамера, электрошитовая и т. д.).

Исходя из приведённой выше схемы организации физкультурно-оздоровительного комплекса видно, что с самим процессом обслуживания занимающихся проблем нет: схема разработана, опробована и внедрена уже давно. Вот привлечение большего количества занимающихся разных возрастных групп, не взирая на факторы определяющие степень участия в спортивных мероприятиях отдельного индивида – реальная задача, решение которой требует поиска новой концепции физкультурно-оздоровительного комплекса.

Если представить физкультурно-оздоровительный комплекс как один из общественно-досуговых центров жилого района, то в укрупнённой схеме функционального зонирования можно выделить четвёртую группу, которая будет представлена помещениями досугового характера, не участвующими в физкультурно-оздоровительных мероприятиях. Целью создания данной группы является привлечение большего количества посетителей. В этом смысле ФОК должен стать более центром досуга, чем просто занятий спортом и оздоровления. Здесь может быть расположен клуб болельщиков местной футбольной команды, небольшой магазин спортивных товаров, просмотрный зал спортивной кинохроники, спорт-кафе и др. В конечном счёте ФОК может стать местом

встреч и общения людей просто интересующихся спортом. Всё это даст дополнительные средства на содержание ФОКа, повысит его рентабельность, позволит снизить цены за обслуживание, и в конечном итоге, привлечёт значительную часть населения к занятиям спортом.

Следует помнить, что как бы ни была привлекательна идея создания «досугового физкультурно-оздоровительного центра», не следует чрезмерно увеличивать площади и количество помещений общественного назначения; замещать главную – физкультурно-оздоровительную функцию сопутствующей, близкой по значению – общественно-досуговой. Эта ошибка повлечёт за собой неоправданное удорожание строительства и эксплуатации сооружения.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Резников Н. В. Комплексные спортивные сооружения. М.,Стройиздат, 1975. 384 с.
2. Филимонов С. Д. Архитектура универсальных зрелищно-спортивных залов.- Мн.: Выш.школа, 1980.-118 с.
3. СНиП 2.08.02-89\*
4. СНиП 2.07.01-89\*
5. СНиП 1.01.02-83
6. МГСН 4.08-97
7. Справочное пособие «Проектирование бассейнов» (к СНиП 2.08.02-89\*)

УДК 697.137.2

**Афонин А.В., Никитин В.И.**

**ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРОПРОНИЦАЕМОСТИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ТЕЧЕНИЯ СОРБЦИОННЫХ ПЛЕНОК И КОНДЕНСАТА**

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Строительные конструкции из капиллярно-пористых материалов подвергаются довольно сложному агрессивному воздействию окружающей среды. Эти воздействия могут иметь физический, химический, физико-химический и другой

характер. Так, жидкость, проникающая в материал диффузионным путем, либо в процессе конденсации, способна вызывать разрушение несколькими способами. Во-первых, объемное расширение воды в процессе замораживания приводит к повреждению микроструктуры материала. Во-вторых, боль-

*Афонин Александр Владимирович. Аспирант каф. технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.*

*Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.*

*Никитин Вадим Иванович. Д.т.н., профессор Политехники Белостоцкой, Польша.*

шое отрицательное давление жидкости под менисками в мелких порах также способно вызывать микрповреждения. Наконец, присутствие влаги приводит к набуханию (усадке) и росту напряжений в материале на макроуровне. Все это ведет к деструкции материала.

При решении ряда практических задач важно знать количественную сторону явления проникновения агрессивной среды в капиллярно-пористые материалы конструкций. Поскольку в большинстве случаев среда перемещается в толще материала в виде пара, то точность количественных оценок такого рода существенно зависит от точности оценки коэффициента диффузии пара в порах материала (паропроницаемости). В ряде работ [1, 2, 3] отмечается, что кроме переноса пара, существуют другие механизмы переноса влаги, такие, как течение тонких сорбционных пленок, покрывающих стенки пор, и течение конденсата, существенно влияющие на значение паропроницаемости. В данной работе, которая носит теоретический характер, выяснено, от каких параметров зависит коэффициент паропроницаемости и установлен аналитический вид этой зависимости для различных классов капиллярно-пористых материалов.

### 1.1. Уравнения диффузии пара

В предыдущих работах авторов [4, 5] изучался процесс перемещения жидкой влаги под действием градиента весовой влажности материала, а также силы тяжести. Искомой величиной уравнений перемещения являлась весовая влажность материала. При этом градиентом парциального давления пара пренебрегали.

В данной работе изучается процесс перемещения влаги под действием градиента парциального давления пара. В качестве искомой величины уравнений перемещения принимается парциальное давление пара.

Процесс нестационарного изотермического перемещения пара в капиллярно-пористом материале описывается уравнением [2, 6, 7, 8], представляющим собой закон сохранения массы:

$$\rho_0 \xi \frac{\partial e}{\partial t} + \text{div} \vec{j} = 0, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – плотность материала в сухом состоянии [кг·м<sup>-3</sup>];  $\xi$  – удельная пароемкость материала [Па<sup>-1</sup>];  $e$  – парциальное давление пара [Па];  $\vec{j}$  – вектор плотности потока влаги [кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>].

Вектор плотности потока влаги пропорционален градиенту парциального давления пара:

$$\vec{j} = -\mu \vec{\nabla} e, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент паропроницаемости материала [с].

Удельную пароемкость находят по изотерме сорбции материала (рис.1, где  $\phi = e/E$  – относительная влажность воздуха)

$$\omega = \omega(e), \quad (3)$$

где  $\omega$  – весовая влажность материала, согласно формуле

$$\xi = \frac{d\omega}{de}. \quad (4)$$

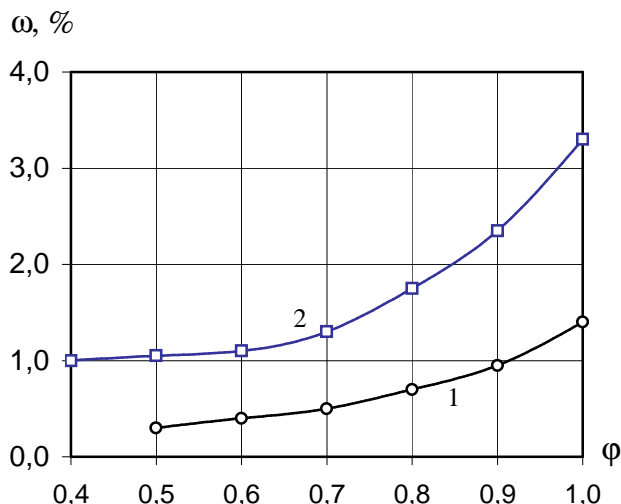


Рис. 1. Изотермы сорбции согласно [6]:

- 1 – плотного бетона с  $\rho_0 = 2160 \text{ кг/м}^3$ ,
- 2 – цементного раствора с  $\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$ .

В дальнейшем вместо весовой влажности будем пользоваться объемной влажностью  $\omega_v$ :

$$\omega_v = \frac{\rho_0}{\rho} \omega, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости [кг·м<sup>-3</sup>].

## 2. РАВНОВЕСНОЕ СОСТОЯНИЕ ВЛАГИ

Прежде, чем описывать движение влаги, необходимо рассмотреть равновесное состояние, которое принимает влага в капиллярах.

### 2.1. Распределение пор по радиусам и размещение влаги

Для описания равновесного состояния и процессов перемещения влаги удобно воспользоваться моделью капиллярной структуры, предложенной в [4]. Согласно этой модели капилляры имеют форму цилиндров кругового поперечного сечения, являются разнонаправленными и взаимосоединяющимися.

Количественно структура материала описывается дифференциальной функцией распределения объема пор по радиусам  $f_v(\mathbf{r})$  [м<sup>-1</sup>], где  $\mathbf{r}$  – радиус капилляра [м] [4, 7, 8]. При этом величина  $f_v(\mathbf{r})d\mathbf{r}$  равна отношению объема капилляров с радиусами от  $\mathbf{r}$  до  $\mathbf{r} + d\mathbf{r}$  к объему материала. Таким образом,

$$\int_0^\infty f_v(\mathbf{r})d\mathbf{r} = P, \quad (6)$$

где  $P$  – интегральная пористость материала.

Объемную влажность материала можно представить в виде суммы:

$$\omega_v = \omega_{vf} + \omega_{vc}, \quad (7)$$

где,  $\omega_{vf}$  и  $\omega_{vc}$  – объемное влагосодержание пленки и конденсата соответственно,

$$\omega_{vc} = \int_0^{r_c} f_v(\mathbf{r})d\mathbf{r} \text{ и } \omega_{vf} = 2 \int_{r_c}^\infty h \frac{f_v(\mathbf{r})}{r} d\mathbf{r}, \quad (8)$$

где  $h$  – толщина пленки [м],  $r_c$  – критический радиус [м] (см. ниже).

Если считать толщину сорбционной пленки  $h$  не зависящей от радиуса капилляра и пренебречь величиной  $\omega_{vc}$  по сравнению с  $\omega_v$ , то можно записать

$$h = \frac{\omega_v}{2P} r_a = \frac{\omega_v}{S_v}, \quad (9)$$

где  $r_a$  – средний радиус пор материала [м],  $S_v$  – удельная поверхность материала [м<sup>-1</sup>].

Средний радиус вычисляется по формуле

$$r_a = \frac{\int_0^\infty f_v(r) dr}{\int_0^\infty \frac{f_v(r)}{r} dr} = \frac{2P}{S_v}, \quad (10)$$

а удельная поверхность равна

$$S_v = 2 \int_0^\infty \frac{f_v(r)}{r} dr. \quad (11)$$

Анализируя данные ртутной порометрии и измерения удельной поверхности цементного камня из нескольких литературных источников [9, 10, 11] и руководствуясь формулой (10), в качестве среднего радиуса пор в рассматриваемых примерах для плотного бетона и цементного раствора авторы приняли средний радиус пор цементного камня  $r_a = 9$  нм, пренебрегая при этом пористостью заполнителей.

### 2.2. Равновесие пара

Рассмотрим участок материала, содержащий достаточно большое количество капилляров и имеющий настолько малые размеры, что состояние влаги в нем можно считать равновесным.

Парциальное давление пара будет одинаково во всех капиллярах рассматриваемого участка. В противном случае такое равновесие установилось бы очень быстро в силу малых размеров участка, и, как следствие, больших возникающих градиентов парциального давления.

### 2.3. Равновесие и устойчивость пленок

Как показано Дерягиным [1], многие механические свойства тонких пленок жидкости можно описывать в терминах расклинивающего давления, равного разности давления газа над пленкой и давления объемной жидкости, находящейся в равновесии с газом при том же парциальном давлении пара. Расклинивающее давление изменяется с толщиной пленки и для объемной жидкости принимается равным нулю.

Равновесие смачивающей пленки в цилиндрическом капилляре кругового сечения, согласно Дерягину [1], описывается формулой:

$$\frac{\sigma}{r-h} + \Pi(h) = \frac{\rho RT}{M} \ln \frac{E}{e} = \Phi(h), \quad (12)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения на границе объемная жидкость – газ [Н·м<sup>-1</sup>];  $h$  – толщина пленки [м];  $\Pi(h)$  – изотерма расклинивающего давления плоской пленки [Па];  $R$  – универсальная газовая постоянная [Дж·моль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>];  $T$  – температура [К];  $M$  – молярная масса газа [кг·моль<sup>-1</sup>];  $E$  – давление насыщенного пара над плоской поверхностью [Па];  $\Phi(h)$  – приведенная изотерма расклинивающего давления.

Условие устойчивости пленки [1, 12] записывается как

$$\frac{\partial \Phi}{\partial h} < 0 \text{ или } \frac{\partial \Pi}{\partial h} < -\frac{\sigma}{(r-h)^2}. \quad (13)$$

Если условие (13) не выполняется, то пленка смыкается и капилляр заполняется конденсатом. Из (13) несложно найти максимальный радиус капилляра  $r_s$ , при котором пленка теряет устойчивость:

$$r_s = h + \sqrt{-\sigma \frac{\partial h}{\partial \Pi}}. \quad (14)$$

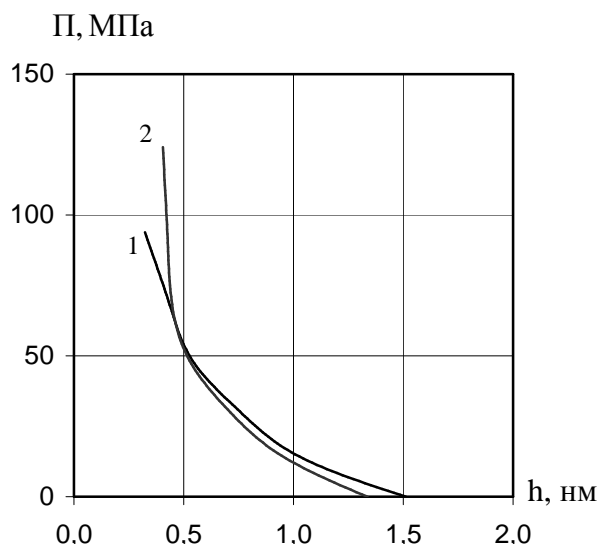


Рис. 2. Изотермы расклинивающего давления:

1 – плотного бетона с  $r_a = 9$  нм,  $P = 0,09$

2 – цементного раствора с  $r_a = 9$  нм,  $P = 0,2$ .

Поскольку для воды справедлива оценка  $\frac{\sigma M}{\rho RT} = 5,4 \cdot 10^{-10}$  м при  $T=293$  К, то для капилляров ха-

рактерного для большинства материалов размера первым членом в (12) можно пренебречь и принять изотерму расклинивающего давления плоской пленки

$$\Pi(h) = \frac{\rho RT}{M} \ln \frac{E}{e}. \quad (15)$$

Изотерма расклинивающего давления  $\Pi(h)$  на рис. 2 была построена исходя из данных о среднем радиусе пор  $r_a$ , пористости  $P$  и изотерме сорбции материала  $\omega_v(e)$  согласно формулам (9) и (15).

Поскольку изотерма расклинивающего давления характеризует не материал, как изотерма сорбции, а вещество, из которого состоит скелет материала, то вполне возможно, что изотермы расклинивающего давления плотного бетона и цементного раствора, состоящих из близких по химическому составу веществ, будут примерно совпадать как на рис. 2.

### 2.4. Краевой угол смачивания

Значение краевого угла смачивания  $\theta$  может значительно изменяться при изменении толщины сорбционной пленки. Как следует из теории смачивания Фрумкина-Дерягина, которая была разработана для плоских подложек [1, 9].

$$\Delta = \Delta_E + \frac{\rho RT}{M} \int_e^E \frac{h}{e} de. \quad (16)$$

где  $\Delta$  – вспомогательная величина [1], характеризующая смачиваемость поверхности, покрытой сорбционным слоем;  $\Delta_E$  – то же, при парциальном давлении пара, равном  $E$ .

В случае, когда  $-2\sigma < \Delta < 0$ , можно вычислить  $\cos \theta$  по формуле

$$\cos \theta = 1 + \Delta/\sigma. \quad (17)$$

Уравнения (16-17) могут быть получены путем интегрирования уравнения адсорбции Гиббса и сравнения с известным уравнением Юнга для краевого угла смачивания.

Графики величины  $\Delta$  в зависимости от относительной влажности воздуха изображены на рис. 3.

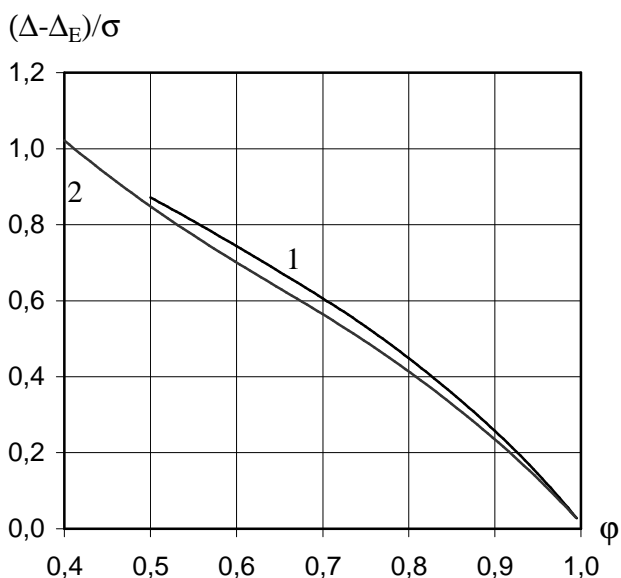


Рис. 3. Зависимость величины  $\Delta$ , определяющей косинус краевого угла смачивания от относительной влажности воздуха  $\phi$ :

1 – плотный бетон, 2 – цементный раствор.

Как видно из рис. 3 и формулы (17), величина  $\Delta$ , а с ней и  $\cos \theta$  могут меняться в весьма широком диапазоне. С увеличением относительной влажности воздуха смачиваемость материала падает, а краевой угол  $\theta$  растет. Это объясняется уменьшением поверхностного натяжения твердой поверхности, покрытой пленкой, с увеличением толщины адсорбционного слоя.

### 2.5. Равновесие конденсата

Конденсат, находящийся в равновесии с ненасыщенным паром в гидрофильном материале, образует мениски с эффективным радиусом  $r_m$  и, согласно известным формулам Лапласа и Кельвина, имеет давление  $p$ :

$$p - p_a = -\frac{2\sigma}{r_m} = -\frac{\rho RT}{M} \ln \frac{E}{e}, \quad (18)$$

где  $p_a$  – атмосферное давление.

Поскольку давление жидкости  $p$  убывает с уменьшением радиуса капилляра, в равновесном состоянии конденсат будет занимать все капилляры с радиусами от 0 до некоторого критического радиуса  $r_c$  [4]. Радиус капилляров  $r_w$ , содержа-

щих мениски, при выполнении условия устойчивости (13), определяется по формуле:

$$r_w = r_m (1 + \Delta/\sigma), \quad (19)$$

Если пленка теряет устойчивость при большем радиусе капилляров, то мениски согласно принятой модели образуются не в капиллярах, а в местах их соединения. В общем случае критический радиус следует принять равным

$$r_c = \max(r_w, r_s). \quad (20)$$

На рис. 4 показаны графики толщины сорбционного слоя  $h$  (9), максимального радиуса капилляра, в котором пленка теряет устойчивость  $r_s$  (14), эффективного радиуса мениска  $r_m$  (18) и радиуса капилляров, содержащих мениски  $r_w$  (19) в зависимости от относительной влажности воздуха. Поскольку значение косинуса краевого угла смачивания не отражается на окончательной формуле для коэффициента паропроницаемости, при вычислении  $r_w$  по формулам (16), (19)

было принято  $\Delta_E = -\sigma$ , что соответствует промежуточному между гидрофильным и гидрофобным [8] при 100% влажности воздуха материалу и отвечает характеру приведенных в [6] изотерм сорбции. Как видно из рис. 4, величины  $h$ ,  $r_s$  и  $r_w$ , вычисленные по совершенно различным формулам, имеют один порядок.

было принято  $\Delta_E = -\sigma$ , что соответствует промежуточному между гидрофильным и гидрофобным [8] при 100% влажности воздуха материалу и отвечает характеру приведенных в [6] изотерм сорбции. Как видно из рис. 4, величины  $h$ ,  $r_s$  и  $r_w$ , вычисленные по совершенно различным формулам, имеют один порядок.

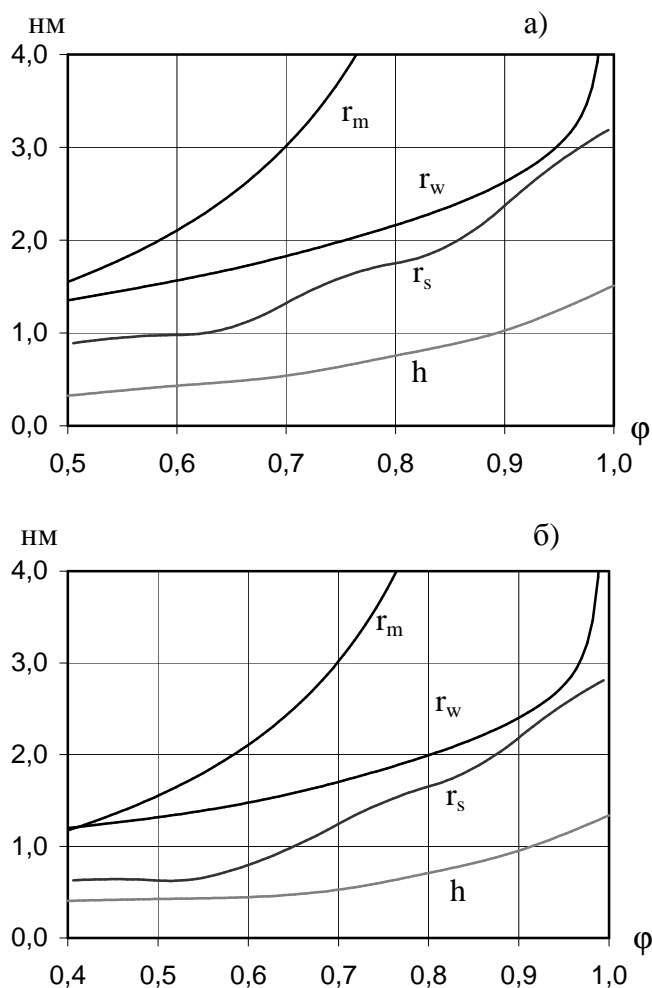


Рис. 4. Зависимости величин  $h$ ,  $r_s$ ,  $r_m$ ,  $r_w$  от относительной влажности воздуха:

а) – для плотного бетона,  
б) – для цементного раствора.

### 3. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ВЛАГИ

#### 3.1. Коэффициент извилистости

Коэффициент извилистости  $\chi$  является геометрической характеристикой материала. Он характеризует отношение длины пути, проходимого элементом сплошной среды к длине участка материала и может быть вычислен в зависимости от пористости по формуле [4, 5, 13]:

$$\chi(P) = P \left\{ \frac{1}{2} + \sin \left[ \frac{\arcsin(2P-1)}{3} \right] \right\}^{-2}. \quad (21)$$

Согласно (21) коэффициент  $\chi$  изменяется от 3 при  $P=0$  до 1 при  $P=1$ .

#### 3.2. Диффузия пара

При наличии градиента парциального давления пара в материале возникает поток пара  $\vec{j}_v$ , пропорциональный этому градиенту:

$$\vec{j}_v = -\mu_v \vec{\nabla} e. \quad (22)$$

В случае, когда средний радиус капилляра заметно превышает среднюю длину свободного пробега молекулы пара в воздухе  $l$ , для вычисления коэффициента диффузии пара в материале  $\mu_v$  можно пользоваться формулой

$$\mu_v = \mu_g \frac{P - \omega_v}{\chi(P - \omega_v)}, \quad (23)$$

где  $\mu_g$  коэффициент диффузии пара в воздухе (для воды при  $T = 293 \text{ K}$   $\mu_g = 1,9 \cdot 10^{-10} \text{ c}$ ).

В предыдущих работах авторов [4, 5, 13], приведена формула для коэффициента паропроницаемости, совпадающая с (23), за исключением того, что в данной работе вместо пористости  $P$  используется величина  $P - \omega_v$ , учитывающая уменьшение занимаемого газом порового пространства вследствие присутствия жидкой влаги. Такая формула может быть использована для широкопористых материалов ( $r_a \gg 10^{-7} \text{ м}$ ) с довольно низкой сорбционной способностью, движением пленочной влаги в которых можно пренебречь.

Формула для коэффициента паропроницаемости, аналогичная (23), давно и весьма широко известна (см. например [8]). Приведем, однако, здесь более подробный вывод этой формулы, поскольку он используется в данной статье несколько раз. Обозначим через  $\vec{j}_g$  плотность потока пара в воздухе. Тогда

$$\vec{j}_g = -\mu_g \vec{\nabla} e. \quad (24)$$

Если бы капилляры материала были прямолинейными и направленными вдоль вектора плотности потока влаги  $\vec{j}_g$ , то количество парообразной влаги, проходящей в единицу времени через капилляры с общей площадью поперечного сечения  $S$  было бы равно  $Q = |\vec{j}_g| S$ . Если обозначить площадь сечения материала, соответствующую указанной группе капилляров через  $S_0$ , то плотность потока парообразной влаги через материал при указанной прямолинейности капилляров составила бы  $\frac{Q}{S_0} = \frac{S}{S_0} |\vec{j}_g|$ . Отношение  $\frac{S}{S_0}$  характеризует в

данном случае относительную площадь сечения не занятого жидкостью порового пространства, сквозь которое проходит

пар и равно  $P - \omega_v$ . Эта величина стоит в числителе рассматриваемой формулы для  $\mu_v$ . Если учесть, что капилляры не являются прямолинейными и их длина больше длины участка материала в  $\chi(P - \omega_v)$  раз, где  $P - \omega_v$  в данном случае характеризует относительный объем занимаемого паром порового пространства, то следует вектор градиента парциального давления пара разделить на  $\chi(P - \omega_v)$ , в результате чего и будем иметь выражение для плотности потока пара через материал:

$$\vec{j}_v = -\mu_g \frac{P - \omega_v}{\chi(P - \omega_v)} \vec{\nabla} e. \quad (25)$$

Если средний радиус капилляра  $r_a$  значительно меньше средней длины свободного пробега молекулы (для воды при  $T = 293 \text{ K}$   $l \sim 10^{-7} \text{ м}$ ), то диффузия пара подчиняется закону свободномолекулярного течения (течения Кнудсена):

$$\mu_v = \frac{8}{3} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} r_a \frac{P - \omega_v}{\chi(P - \omega_v)}. \quad (26)$$

Промежуточные случаи рассмотрены в [14].

#### 3.3. Вязкость воды в узких капиллярах и пленках

Основываясь на данных Дерягина и Чураева [1, 14] для пленок на поверхности кварца толщиной 3-4 нм и кварцевых капилляров радиусом от 30 нм до 1 мкм, авторами была получена эмпирическая зависимость кинематической вязкости воды  $\nu$  [ $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ] от толщины пленки или радиуса капилляра  $h$  [м]:

$$\nu(h) = \nu_0 (1 + 6,3 \cdot 10^{-7} h^{-0,79}), \quad (27)$$

где  $\nu_0$  – вязкость объемной воды. Вязкость воды в пленке толщиной 1 нм, предсказываемая формулой (27), в 9 раз больше вязкости объемной воды.

#### 3.4. Течение пленок

Градиент парциального давления пара вызывает градиент расклинивающего давления:

$$\vec{\nabla} \Pi = -\frac{\rho RT}{Me} \vec{\nabla} e, \quad (28)$$

который приводит пленку в движение с плотностью потока

$$\vec{j}_f = -\mu_f \vec{\nabla} e. \quad (29)$$

Считая, что  $h \ll r$ , согласно известному закону течения плоских слоев вязкой жидкости [1, 15], можно записать:

$$\vec{j}_f = \frac{h^2}{3\nu(h)} \frac{\omega_{vf}}{\chi(P - \omega_v)} \vec{\nabla} \Pi, \quad (30)$$

следовательно

$$\mu_f = \frac{\rho R T h^2 \omega_{vf}}{3\nu(h) Me \chi(P - \omega_v)}. \quad (31)$$

#### 3.5. Течение конденсата

При наличии градиента парциального давления пара согласно (18) возникает градиент давления объемной жидкости

$$\vec{\nabla} p = \frac{\rho RT}{Me} \vec{\nabla} e, \quad (32)$$

приводящий в движение конденсат с плотностью потока

$$\vec{j}_c = -\mu_c \vec{\nabla} e. \quad (33)$$

Согласно закону Пуазейля течения вязкой жидкости по капилляру кругового сечения с гидравлическим радиусом  $r_h$

$$r_h = \int_0^{r_c} f_v(r) dr / \int_0^{r_c} \frac{f_v(r)}{r} dr, \quad (34)$$

плотность потока равна

$$\vec{j}_c = -\frac{r_h^2}{8v(r_h)} \frac{\omega_{vc}}{\chi(\omega_{vc})} \vec{\nabla} p. \quad (35)$$

Поэтому

$$\mu_c = \frac{\rho R T r_h^2 \omega_{vc}}{8v(r_h) M e \chi(\omega_{vc})}. \quad (36)$$

### 3.6. Суммарный коэффициент паропроницаемости

Суммируя значения плотностей потока, получим окончательное выражение для коэффициента паропроницаемости:

$$\mu = \mu_v + \mu_f + \mu_c. \quad (37)$$

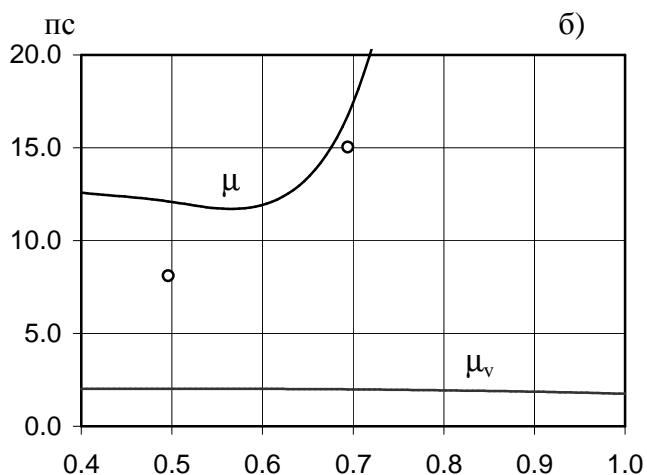
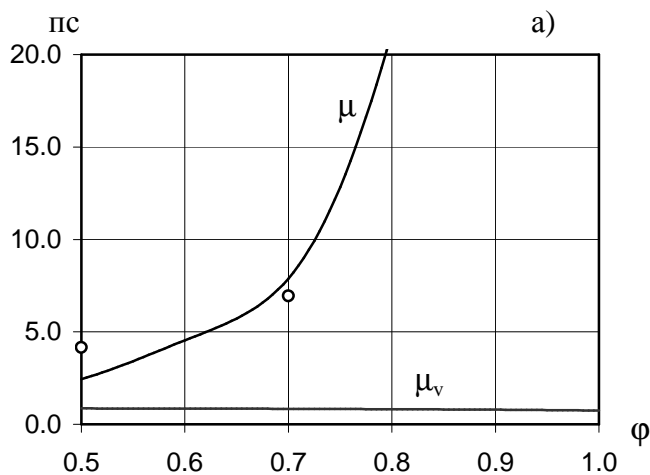


Рис. 5. Зависимость паропроницаемости  $\mu$  и  $\mu_v$  от относительной влажности воздуха. Кружочками обозначены опытные данные [2]:

а) – для плотного бетона, б) – для цементного раствора.

Что касается слагаемого  $\mu_c$ , описывающего течение конденсата, его строгое вычисление в настоящее время практически невозможно в силу того, что поведение функции распределения объема пор по радиусам при столь малых значениях  $r$  находится за пределами современных возможностей измерения ртутными порометрами (1,5 – 3 нм).

Тем не менее следует отметить, что формула (36), полученная для  $\mu_c$ , выглядит подобно формуле (31) для пленочной составляющей коэффициента паропроницаемости  $\mu_f$ , причем вместо толщины пленки  $h$  в ней фигурирует гидравлический радиус  $r_h$ , а вместо пленочного объемного влагосодержания  $\omega_{vf}$  – объемное влагосодержание конденсата  $\omega_{vc}$ . Учитывая, что величины  $h$  и  $r_h$  должны быть довольно близки друг к другу (см. рис. 4 и формулы (20) и (34)), а сумма величин  $\omega_{vf}$  и  $\omega_{vc}$  представляет собой суммарное объемное влагосодержание  $\omega_v$ , авторы приняли в итоговой формуле вместо суммы  $\mu_f + \mu_c$  одно слагаемое  $\mu_f$ , в котором вместо  $\omega_{vf}$  стоит суммарная величина  $\omega_v$ . Точность этой итоговой формулы зависит от того, насколько реальное значение  $\omega_{vc}$  меньше  $\omega_v$  (см. формулы (7)-(8)). Поскольку объем пор цементного раствора с радиусами меньше 5 нм может занимать от 20% до 2% всего объема порового пространства [10], то, согласно довольно грубой оценке,  $\omega_{vc}$  может превосходить  $\omega_v$  от 2-3 до 15-20 раз.

Использованная формула имеет вид:

$$\mu = \frac{8}{3} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \frac{P - \omega_v}{r_a \chi(P - \omega_v)} + \frac{\rho R T h^2 \omega_v}{3v(h) M e \chi(P - \omega_v)}, \quad (38)$$

где величины  $h$ ,  $\chi$ ,  $v$  определяются из (9), (21), (27) соответственно.

Как видно из рис. 5, коэффициент паропроницаемости плотного бетона и цементного раствора может существенно изменяться с изменением влажности воздуха. Теория показывает, что при больших значениях влажности значение  $\mu$  может превышать значение паропроницаемости воздуха  $\mu_g$ .

Формула (38) может быть использована для узкопористых материалов ( $r_a \ll 10^{-7}$  м) таких, как бетон, поскольку для описания перемещения парообразной влаги в ней используется формула эффузии Кнудсена. Очевидно, что для широкопористых материалов в качестве первого члена в (38) следует применять формулу (23) для  $\mu_v$ .

Второй член формулы (38) описывает перемещение пленочной влаги под действием градиента парциального давления пара. Значение этого члена для одних материалов может быть весьма велико, как в рассматриваемых в статье примерах, и приводить к существенному изменению коэффициента паропроницаемости материала в зависимости от влажности воздуха. Для других материалов, с более низкими толщиной сорбционной пленки и удельной поверхностью, величина

второго члена формулы (38) может быть пренебрежимо мала по сравнению с первым членом (который практически не зависит от влажности), что приводит к тому, что коэффициент паропроницаемости материала почти не зависит от влажности воздуха. Этот результат качественно подтверждает многочисленные опытные данные для различных материалов [2, 16].

Согласно современным экспериментальным исследованиям [16, 17], коэффициент паропроницаемости двух образцов из одного и того же материала при одной и той же относительной влажности воздуха может отличаться в два и более раз. То же самое можно сказать об изотерме сорбции и о среднем радиусе пор материала. Поэтому авторы считают, что совпадение опытных данных для коэффициента паропроницаемости, приведенных в примерах данной статьи, с расчетными (рис. 5) является удовлетворительным, учитывая, что данные по коэффициенту паропроницаемости, изотерме сорбции и среднему радиусу пор были взяты из разных литературных источников.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следовало бы отметить, что полученные в данной статье формулы для коэффициента паропроницаемости капиллярно-пористых материалов гораздо подробнее и точнее теоретически обоснованы, чем, например, широко известная в отечественной литературе по строительной теплотехнике формула В.М. Ильинского [2, 6]:

$$\mu_x = \mu_{80} \frac{\omega_x}{\omega_{80}}, \quad (39)$$

где  $\mu_x$  и  $\omega_x$  – коэффициент паропроницаемости и весовая влажность материала при относительной влажности воздуха  $X$ ;  $\mu_{80}$  и  $\omega_{80}$  – то же при относительной влажности воздуха 80%. Эта формула предсказывает пропорциональное изотерме сорбции увеличение коэффициента паропроницаемости любого материала с увеличением относительной влажности воздуха, в то время как согласно полученным в рассматриваемой статье результатам коэффициент паропроницаемости может и убывать (см. рис. 5б) или практически не изменяться или же возрастать гораздо быстрее, чем изотерма сорбции, что в большей степени соответствует имеющимся в настоящее время опытным данным [16].

Полученная математическая модель дает возможность оценить влияние на значения коэффициента паропроницаемости таких факторов, как средний радиус пор, пористость, объемная сорбционная влажность при данном парциальном давлении и др. Выполненные исследования позволяют расширить представления об явлении переноса влаги в пределах сорбционного увлажнения материала и более обоснованно подходить к выбору инженерных решений при изготовлении материалов и их использованию в ограждающих конструкциях.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. Смачивающие пленки. – М.: Наука, 1984. – 160 с.

2. Ильинский В.М. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий). Уч. пособие для инж.-строит. вузов. – М.: Высш. школа, 1974. – 320 с.
3. Garbalinska H. Warunki wilgotnościowe a współczynnik dyfuzji pary wodnej styropianu. XLIV Konferencja naukowa "Krynica". Poznań. 1998.
4. Афонин А.В., Никитин В.И. Вычисление коэффициентов переноса жидкой влаги в капиллярно-пористых строительных материалах // Вестник Брестского государственного технического университета. №1(13), 2002. Серия "Строительство и архитектура". – Брест, 2002. – 174 с. – С. 10-15.
5. Афонин А.В., Никитин В.И. К расчету переноса жидкой влаги в капиллярно-пористых материалах // Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений, подготовки инженерных кадров для строительной отрасли: Материалы VIII Междунар. науч.-практ. семинара (Минск, 15-16 нояб. 2001 г.) / Ред. колл.: Э.И. Батяновский (отв. ред.) и др. – Мн.: Стринко, 2001. – 424 с. – С. 29-34.
6. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
7. Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики. – Мн.: Изд-во Акад. Наук БССР, 1961. – 520 с.
8. Лыков А.В. Теплообмен (Справочник). – М. Энергия, 1978. – 480 с.
9. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. – М.: Мир, 1979. – 568 с.
10. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
11. Ait-Mokhtar A., Amiri O., Sammartino S. Analytic modelling and experimental study of the porosity and permeability of porous medium — application to cement mortars and granitic rock // Magazine of Concrete Research, 1999, 51, No. 6, Dec., 391-396.
12. Дерягин Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок / АН СССР, Ин-т физ. химии. – М.: Наука, 1986. – 204 с.
13. Афонин А.В. Расчет паропроницаемости пористых материалов методом аналогии // Сб. трудов Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 18-20 декабря 2000 г. / Под ред. проф. В.В. Тура – Брест: БГТУ, 2001. – 200 с. – С. 151-155.
14. Чураев Н.В. Физикохимия процессов переноса в пористых телах. – М.: Химия, 1990. – 271 с.
15. Дерягин Б.В. и др. Поверхностные силы / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, В.М. Муллер. Отв. ред. Е.Д. Щукин. – М.: Наука, 1985. – 399 с.
16. Burch D.M., Desjarlais A.O. Water-Vapour Measurements of Low-Slope Roofing Materials. – Building of and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology. – Gaithersburg, MD 20899. – July 1995. – 28 p.
17. Wyrwał J., Świrska J. Problemy zawilgocenia przegród budowlanych. – Polska Akademia Nauk. Komitet inżynierii lądowej i wodnej. Instytut podstawowych problemów techniki. – Warszawa, 1998.