

А.Г. ПЕРЕХОЖЕНЦЕВ, д-р техн. наук,  
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

## Моделирование температурно-влажностных процессов в пористых строительных материалах. Часть 3.

### Расчет коэффициентов диффузии водяного пара в пористых материалах по характеристикам их пористой структуры

Известно [1], что в соответствии со спецификой взаимодействия молекул пара со стенками капилляра поток пара во всем диапазоне изменения размеров пор будет складываться из двух разных по своей физической природе потоков: кнудсеновского потока в порах с размерами радиусов до  $r^{Kn}$  и молекулярного потока пара в порах с радиусами более  $r^{Kn}$ .

Поток пара в кнудсеновском режиме будет пропорционален концентрации пара, радиусу капилляра и средней тепловой скорости молекул [1]:

$$J_1^{Kn} = -2/3(8RT/\pi M_1)^{1/2} \int_{r_0}^{r^{Kn}} r f_V(r) dr \nabla p, \quad (1)$$

или

$$J_1^{Kn} = -D^{Kn} \cdot \nabla p, \quad (2)$$

где  $D^{Kn}$  – коэффициент диффузии при кнудсеновском режиме течения;  $r^{Kn}$  – максимальный размер радиуса капилляров, в которых возможно кнудсеновское течение;  $M_1$  – молекулярная масса водяного пара;  $T$  – температура.

Коэффициент кнудсеновской диффузии  $D^{Kn}$  из (1) соответственно будет равен:

$$D^{Kn} = \left( 2603,29 \cdot 10^{-10} (T)^{1/2} \int_{r_0}^{r^{Kn}} r f_V(r) dr \right) / d_l, \quad (3)$$

где  $r$  – радиус поры, нм;  $d_l$  – коэффициент извилистости пор.

При размерах пор, соизмеримых с радиусом действия сил притяжения молекул пара стенками, нарушается условие линейности траекторий движения молекул, которое использовано при выводе уравнения Кнудсена. Поэтому уравнение (1) имеет ограничение не только по  $r_{max}$ , но и по  $r_0$ . Так, радиусы капилляров, где начинает проявляться действие молекулярных сил  $r_0$ , составляют примерно 20 радиусов молекулы воды. При размере радиуса молекулы воды, равном 0,1345 нм при  $T=273,15$  К, эта величина будет равна 2,69 нм, что соответствует относительному давлению пара воды  $p/p_s \approx 0,6$ . При изменении температуры она будет изменяться, при повышении температуры  $r_0$  уменьшается.

Свободные от жидкости поры заполнены не только парами воды, но и воздухом. Поэтому необходимо учитывать взаимную диффузию водяного пара и воздуха. Если давление в порах принять равным давлению в окружающей среде  $P_B$ , то изотермический поток водяного пара (индекс 1) через воздух (индекс 2) равен:

$$J_1 = - \frac{D_{12} M_1}{RT(1-p_1/P_0)} \frac{dp_1}{dx}, \quad (4)$$

где  $P_0 = p_1 + p_2$  – общее давление парогазовой смеси.

Коэффициент диффузии водяного пара через воздушную среду ( $m^2/ч$ ) с достаточной точностью [2] можно определить по формуле:

$$D_{12} = 0,086 (T/273)^{1,81} 0,101/P_0, \quad (5)$$

где  $P_0$  – барометрическое давление, МПа.

Подставляя (5) в уравнение пара в одиночном капилляре (4), напомним уравнение потока для капиллярно-пористого тела как системы капилляров с произвольной функцией распределения пор по размерам радиусов:

$$J_1 = - \frac{0,086 (T/273)^{1,81} 0,101/P_0 \cdot M_1}{RT(1-p_1/P_0)} \int_{r^{Kn}}^{r_{max}} f(r) dr \frac{dp_1}{dx}. \quad (6)$$

При нормальном барометрическом давлении  $P_0$ , равном 0,101 МПа, коэффициент диффузии водяного пара из (6) будет равен:

$$D^M = \frac{0,086 (T/273)^{1,81} M_1}{RT(1-p_1/0,101)} \int_{r^{Kn}}^{r_{max}} f_V(r) dr, \quad (7)$$

где  $D^M$  – коэффициент молекулярной диффузии пара.

Так как, поток пара во всем диапазоне изменения пор будет складываться из кнудсеновского и молекулярного потоков пара, то для того чтобы одновременно использовать оба уравнения, необходимо уравнение кнудсеновского течения (1) преобразовать к диффузному виду:

$$J_1 = (M_1 D^{Kn}/RT) \nabla p = D^{Kn} \nabla p. \quad (8)$$

В целом общей характеристикой переноса влаги в виде пара для капиллярно-пористого материала, имеющего поры, размеры которых изменяются в широких пределах, будет общий коэффициент диффузии водяного пара  $k_1$ , равный:

$$k_1 = D^{Kn} + D^M, \quad (9)$$

где  $k_1$  – коэффициент диффузии парообразной влаги в пористых материалах, кг/(м·ч·Па);  $D^{Kn}$  и  $D^M$  – соответственно коэффициенты кнудсеновской и молекулярной диффузии, которые с учетом коэффициентов извилистости определяют по формулам:

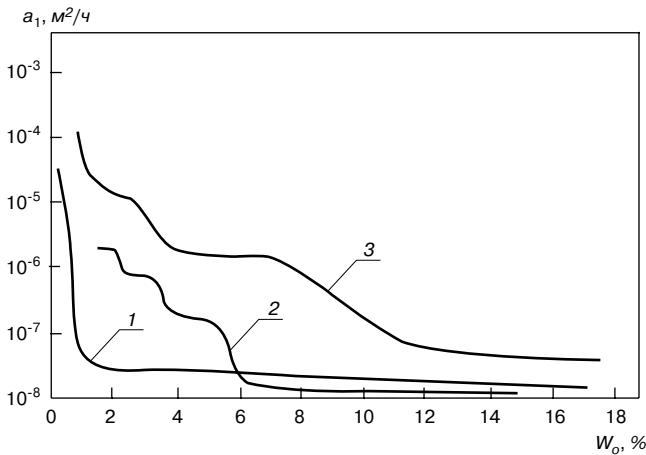


Рис. 1. Зависимости коэффициентов диффузии водяного пара  $a$  от влагосодержания материалов: 1 – красный кирпич; 2 – цементный раствор; 3 – газосиликат

$$D^{Kn} = \left( 5,64 \cdot 10^{-10} (T)^{1/2} \int_{r_0}^{r_{Kn}} r \cdot f_V(r) dr \right) / (T \cdot d_1); \quad (10)$$

$$D^M = \left( 1,863 \cdot 10^{-4} (T/273)^{1,81} \int_{r_{Kn}}^r f_V(r) dr \right) / (T(1-p_1/P_0)d_1). \quad (11)$$

Как показывают расчеты, вклад кнудсеновского потока в общий поток пара составляет незначительную долю по сравнению с молекулярным потоком пара.

Коэффициенты диффузии водяного пара, отнесенные к влагосодержаниям пористого материала, получим делением  $k_1$  на  $c_p = dw/dp$  и  $\rho_0$ , т. е.  $a_1 = k_1 / (c_p \cdot \rho_0)$ . На рис. 1 приведены зависимости коэффициентов диффузии водяного пара  $a_1$ , м²/ч, от объемного влагосодержания некоторых наиболее распространенных строительных материалов. Коэффициенты диффузии водяного пара в сухом пористом материале имеют максимальные значения. Однако уже на начальной стадии увлажнения они уменьшаются на несколько порядков, что связано с закупориванием сквозных пор при увлажнении материала. Для красного кирпича это происходит при влагосодержании, равном 0,9%, цементного раствора – 6,2%, а для газосиликата – 11,2%, т. е. для разных материалов этот диапазон увлажнения различен.

В нормативных документах (СП 23-101–2004) основной влажностной характеристикой строительного материала является коэффициент паропроницаемости  $\mu$ . Аналогом этого коэффициента служит коэффициент молекулярной диффузии пара  $D^M \cdot 10^6$  мг/(м·ч·Па), рассчитанный по формуле (11).

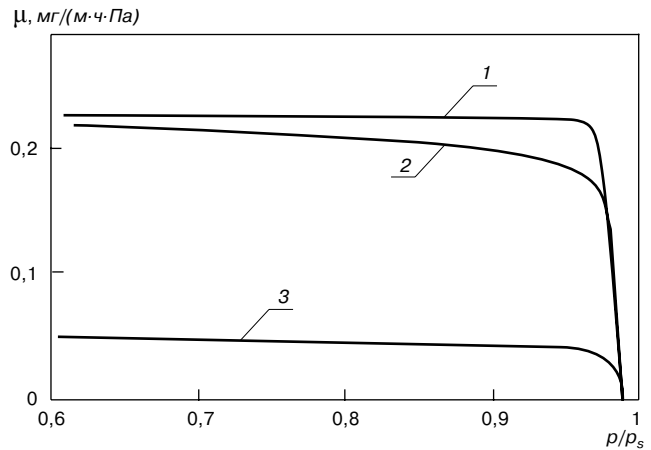


Рис. 2. Зависимость коэффициентов паропроницаемости  $\mu$  от относительной влажности воздуха  $p/p_s$ : 1 – красный кирпич; 2 – керамзитобетон; 3 – цементный раствор

Известно, что с изменением влагосодержания пористого материала его паропроницаемость изменяется. На начальной стадии увлажнения, пока идет образование моно- и полимолекулярных адсорбированных слоев и основной объем пор остается открытым для диффузии пара, это изменение остается незначительным. Однако с началом капиллярной конденсации происходит объемное заполнение микропор и соответственно их закупоривание, что, в свою очередь, приводит к резкому снижению паропроницаемости материала. Этот процесс очень хорошо прослеживается на зависимостях коэффициентов паропроницаемости от относительной влажности воздуха (рис. 2).

До значений  $p/p_s = 0,95-0,96$  эта зависимость почти линейная с незначительным уменьшением  $\mu$ . При  $p/p_s > 0,96$  значения коэффициентов  $\mu$  резко уменьшаются и при  $p/p_s = 1$  будут равны нулю, так как в этом случае поры материала будут заполнены водой. Вместе с тем изменение коэффициентов паропроницаемости и объемной влажности материала имеет линейную зависимость. На рис. 3 приведены такие зависимости для глиняного обожженного кирпича, керамзитобетона и цементно-песчаного раствора. Следовательно, зная значение коэффициента  $\mu_0$  в сухом состоянии, можно прогнозировать его значение при любом влагосодержании  $w_0$ :

$$\mu_w = \mu_0 - (\Delta\mu / \Delta w) w_0. \quad (12)$$

Так как при  $w_0 = 0$  коэффициент паропроницаемости равен  $\mu_0$ , а при полном влагонасыщении материала

Материал	Плотность, кг/м³	$\mu$ , мг/(м·ч·Па)		
		СП 23-101-2004	По Фокину [3]	Расчет по (11)
Газосиликат	390	0,23	0,46	0,41
Пенобетон	600	0,17	0,31	0,15
Газобетон	510	0,2	0,38	0,26
Керамзитобетон	1350	0,12	0,19	0,21
Кирпич красный	1690	0,12	0,19	0,26
Раствор цементный	1936	0,09	0,16	0,05
Бетон	2160	0,03	0,08	0,06
Пеногипс	300	0,51 (опыт)	0,66	0,32
Минераловатные маты	350	0,38	0,66	0,56

**Примечание.** Плотность материалов в таблице соответствует графе «Расчет». Данные из СП 23-101–2004 и [3] отбирались для материалов с плотностью, близкой к расчетной.

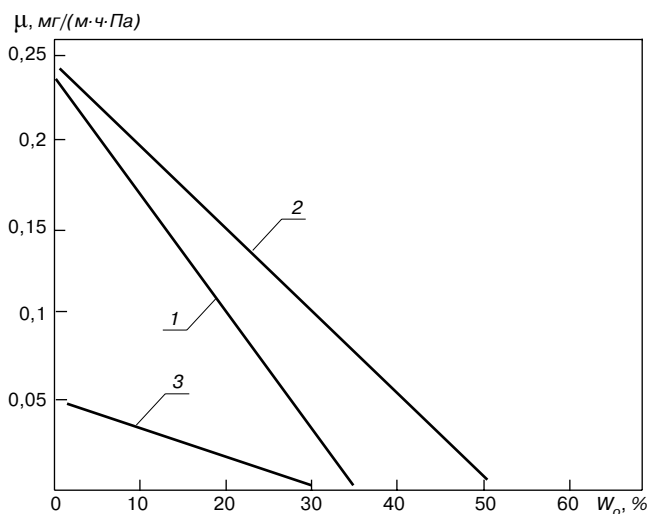


Рис. 3. Зависимость коэффициентов паропроницаемости от объемного влагосодержания материалов: 1 – красный кирпич; 2 – керамзитобетон; 3 – цементный раствор

( $w_0 = w_H$ ) коэффициент  $\mu$  равен нулю, то угловой коэффициент в уравнении (12) будет равен  $\mu_0/w_H$ , а само уравнение примет следующий вид:

$$\mu_w = \mu_0 (1 - w_0 / w_H), \quad (13)$$

где  $\mu_w$  – коэффициент паропроницаемости пористого материала при объемном влагосодержании  $w_0$ ;  $\mu_0$  – коэффициент паропроницаемости абсолютно сухого ма-

териала;  $w_H$  – величина объемного влагосодержания материала при полном водонасыщении.

В таблице представлено сравнение значений коэффициентов паропроницаемости  $\mu$ , полученных расчетом по формуле (11), с опытными данными К.Ф. Фокина [3] и приведенными в СП 23-101–2004. Как видно, порядок и сами значения  $\mu$  близки к опытным данным и приведенным в СП. Полного совпадения данных нет, так как в СП содержатся обобщенные опытные данные, а одноименные материалы у К.Ф. Фокина не всегда совпадают по плотности с расчетными и, следовательно, материалы будут иметь другие характеристики пористой структуры.

Хорошее совпадение опытных данных с расчетными дает основание считать, что приведенную выше расчетную модель пористого тела можно использовать для определения влагопереносных свойств пористых материалов, которые достаточно сложно или трудно определить из прямого опыта.

**Ключевые слова:** пористая структура, диффузия водяного пара.

#### Список литературы

1. Лыков А.В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Гостехиздат, 1954. С. 98–121.
2. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. М.: Энергия, 1978. 680 с.
3. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Стройиздат, 1973. С. 288.

Тема выставки:

## Зеленый дом

Организаторы:

(3852) 65-88-44

XVIII Специализированная выставка-ярмарка

# Строительство Благоустройство Интерьер

15-17  
мая 2013 г.  
г. Барнаул  
Дворец зрелищ и спорта

Ваш электронный пригласительный билет – на сайте [www.altfair.ru](http://www.altfair.ru)