

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 691:539.217.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗВИЛИСТОСТИ КАПИЛЛЯРОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ВЛАГОПЕРЕНОСА

*д-р техн. наук, проф. В.И. НИКИТИН**(Государственная высшая школа в Бялой Подляске, Польша);**В.А. КОФАНОВ**(Брестский государственный технический университет)*

Рассмотрен одномерный поток влаги сквозь тело с извилистыми капиллярами. На основе теории обобщенной проводимости и капиллярной теории получена формула для определения коэффициента извилистости. Выполнен сравнительный анализ предлагаемой формулы с другими формулами, включающими эмпирические коэффициенты, и экспериментальными данными, полученными для зернистых сред и каменных материалов. Предложено учитывать извилистость капилляров при определении коэффициента переноса влаги в капиллярно-пористых строительных материалах.

Введение. Процессы взаимного тепло- и массопереноса в пористых средах лежат в основе различных промышленных технологий. Осознается важность учета этих процессов и в строительстве, прежде всего при проектировании ограждающих конструкций зданий из капиллярно-пористых материалов, поры которых содержат влагу и имеют сложную геометрию, которая трудно поддается теоретическому количественному описанию. В поровом пространстве влажных материалов ограждающих конструкций имеют место процессы нестационарного, обычно одномерного, переноса парообразной и жидкой влаги, описываемые моделями различной сложности. Эти модели описывают указанные процессы с точностью до коэффициентов переноса (коэффициенты влагопереноса, паропроницаемости и т.д.), которые зависят от различных факторов, характеризующих рассматриваемый материал с точки зрения влагопереноса, а также физических свойств переносимой влаги. Среди этих факторов аналитически наиболее трудно с достаточной точностью учесть влияние параметров, характеризующих пористую структуру материала, поэтому коэффициенты переноса влаги обычно определяются экспериментальным путем.

Попытки построения формул для определения коэффициентов переноса влаги на основе упрощенных представлений о пористой структуре материала, чаще всего в виде параллельных прямых капилляров, приводят к необходимости определения еще одной геометрической характеристики пористого материала, учитывающей извилистость его капилляров. Если при одномерном влагопереносе сквозь пористое тело толщиной L известна средняя длина траектории частицы влаги l , то извилистость капилляров оценивается коэффициентом ξ , равным отношению

$$\xi = \frac{l}{L}. \quad (1)$$

Дискуссии относительно извилистости пористой среды ξ и формулы ее определения и экспериментальные данные для различных пористых сред приведены в обширной литературе, например в [1 – 4]. Формулы, предлагаемые для определения кривизны ξ , содержат эмпирические коэффициенты, которые вносят неопределенности при расчетах. Эти модели применимы для узкого круга материалов и в узком диапазоне пористостей. Поэтому возникает необходимость изучить этот вопрос и, опираясь на универсальные научные подходы, разработать более совершенные модели.

В данной работе рассмотрен одномерный поток влаги сквозь тело с извилистыми капиллярами и на основе теории обобщенной проводимости и капиллярной теории получена формула для определения коэффициента извилистости. При выборе указанного метода решения поставленной задачи мы опирались на мнения многих исследователей, в частности авторов работ [1 – 3], о том, что метод обобщенной проводимости, имеющий более чем столетнюю историю, является наиболее надежным и универсальным инструментом для создания моделей переноса тепла и массы в различных пористых средах.

Основные предпосылки и модель для определения коэффициента извилистости капилляров. Рассмотрим одномерный поток жидкой влаги сквозь пористое тело под действием капиллярного давления, создаваемого силами поверхностного натяжения, направленными по касательной к искривленной свободной поверхности жидкости (мениск) в капиллярах (капиллярный перенос влаги). Процесс капиллярного переноса влаги может протекать, к примеру, в поверхностном слое ограждающей конструкции

при косом дожде, поверхностной конденсации влаги, капиллярной конденсации жидкости в мелких порах и др. При этом в слое капиллярного переноса влаги влагосодержание материала w (кг/м³) может меняться от значения сорбционного влагосодержания w_c , при котором в порах материала образуется бесконечный кластер перемещающейся жидкой влаги, до значения w_k , характеризующего момент завершения капиллярного всасывания жидкости при постоянном ее контакте с поверхностью пористого материала.

Для определения коэффициента извилистости капилляров, участвующих в капиллярном переносе влаги, можно воспользоваться формулой Козени, цитируемой по работе [4]:

$$k_f = \frac{P_f^3}{2 \cdot \xi_f \cdot S_{vf}^2}, \quad (2)$$

где k_f – коэффициент проницаемости пористой среды при фильтрационном движении жидкости, м²; P_f – открытая пористость, м³/м³; ξ_f – безразмерный коэффициент, характеризующий извилистость открытых пор и капилляров; S_{vf} – удельная поверхность (площадь поверхности открытых пор и капилляров в единице объема материала), м²/м³.

В рассматриваемом нами случае приведенные в формуле (2) величины следует относить только к пористости Φ , участвующей в капиллярном переносе влаги:

$$\Phi = \frac{w}{\rho}, \quad (3)$$

где w – влагосодержание материала, кг/м³; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Отметим, что значение пористости, найденное по формуле (3) при влагосодержании капиллярного влагонасыщения w_k и называемое обычно активной пористостью Φ_a , имеет важное значение при расчетах процесса капиллярного влагопереноса. Методика определения значения Φ_a рассмотрена во многих работах, в частности в [5; 6].

Если принять, что вдоль потока жидкости пористость материала Φ представлена цилиндрическими капиллярами, средний радиус этих капилляров можно определить по формуле:

$$r_0 = \frac{2 \cdot \Phi}{S_v}, \quad (4)$$

где r_0 – средний радиус капилляров, м; S_v – удельная поверхность пор и капилляров, участвующих в переносе жидкости, м²/м³.

С учетом сказанного получим соотношение для определения коэффициента проницаемости пористого материала при капиллярном переносе влаги:

$$k = \frac{r_0^2}{8} \cdot \frac{\Phi}{\xi}, \quad (5)$$

где k – коэффициент проницаемости пористой среды; ξ – средний коэффициент извилистости капилляров, участвующих в переносе влаги.

При выводе упомянутых формул для расчета коэффициентов проницаемости (проводимости) реальная хаотическая структура материала с взаимопроникающими компонентами, которая считается однородной и изотропной, заменяется адекватной ей моделью с упорядоченной структурой, состоящей из одинаковых элементарных ячеек.

На рисунке 1 изображена восьмая часть элементарной ячейки простейшей модели структуры с взаимопроникающими компонентами, из которой следует, что объем первой компоненты равен

$$V_1 = 3 \cdot \Delta^2 \cdot L - \Delta + \Delta^3 = 3 \cdot \Delta^2 \cdot L - 2 \cdot \Delta^2. \quad (6)$$

После деления этого выражения на объем $V = L^3$ получим объемную концентрацию первой компоненты

$$m_1 = 3 \cdot c^2 - 2 \cdot c^3, \quad (7)$$

где $c = \Delta/L$.

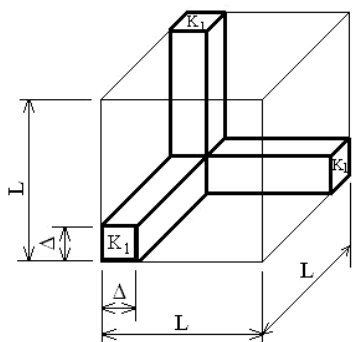


Рис. 1. Восьмая часть элементарной ячейки модели структуры с взаимопроникающими компонентами

С помощью рассмотренной модели авторами работ [2; 3] были получены три зависимости для определения коэффициента проницаемости структуры с взаимопроникающими компонентами.

Для дальнейшего анализа нами была выбрана следующая зависимость:

$$\frac{k}{k_1} = c^2 + \frac{k_2}{k_1} \cdot 1 - c^2 + 2 \cdot \frac{k_2}{k_1} \cdot c \cdot 1 - c \cdot \left(\frac{k_2}{k_1} \cdot c + 1 - c \right)^{-1}, \quad (8)$$

где k_1 и k_2 – коэффициент проницаемости первой и второй компоненты.

Наш выбор этой зависимости основан на утверждении авторов работы [3] о том, что ее широкое применение оправдано хорошим совпадением результатов расчета по формуле (8) с данными многочисленных экспериментов.

Поскольку при капиллярном переносе влаги можно принять, что проницаемость второй компоненты $k_2 = 0$, а проницаемость первой компоненты равна k_1 , то формула (8) примет вид:

$$k = k_1 \cdot c^2, \quad (9)$$

Для расчета параметра $c = \Delta/L$ будем использовать положительный корень уравнения (7), а именно:

$$c = 0,5 + \sin \left[\frac{\arcsin 2 \cdot m_1 - 1}{3} \right], \quad m_1 = \Phi. \quad (10)$$

После определения параметра c неизвестной величиной в формуле (9) остается проницаемость первой компоненты k_1 (поры, заполненные подвижной жидкостью), которую определим из следующих соображений.

Примем, что в пределах элементарной ячейки жидкость перемещается в условном цилиндрическом капилляре длиной L . Выразим радиус этого капилляра через геометрические параметры элементарной ячейки. Для этого разделим объем первой компоненты, определяемой по формуле (6), на размер L и получим среднее значение площади поперечного сечения капилляра

$$\Delta^2 \cdot 3 - 2 \cdot c = \pi \cdot r_0^2. \quad (11)$$

Откуда средний радиус искомого капилляра равен

$$r_0 = \Delta \cdot \sqrt{\frac{3 - 2 \cdot c}{\pi}}. \quad (12)$$

Если известно значение радиуса, найденного, например, по формуле (4), то можно определить значения геометрических параметров модели структуры с взаимопроникающими компонентами. Именно этот радиус будем подразумевать при последующих рассуждениях.

Известно [6; 7], что явление всасывания жидкости цилиндрическим капилляром из гидрофильного материала описывается на основе уравнения Юнга и Лапласа, а также закона Пуазейля исходя из того, что силы капиллярного всасывания уравновешиваются силами трения, тяжести и инерции. Малость скорости всасывания жидкости позволяет пренебречь силами инерции. В горизонтальном капилляре силы тяжести не оказывают влияния на процесс всасывания жидкости, и поэтому скорость перемещения мениска определяется по формуле:

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{r_0 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{4 \cdot \eta \cdot x}, \quad (13)$$

где x – путь, пройденный мениском при капиллярном всасывании жидкости, м; τ – время, за которое пройден путь x , с; r_0 – радиус капилляра, м; σ – поверхностное натяжение на границе жидкость – воздух, Н/м; θ – угол смачивания, град; η – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

При малых значениях τ , x и r_0 в вертикальном или наклонном капилляре масса впитанной жидкости и, следовательно, сила ее тяжести малы, поэтому скорость капиллярного всасывания жидкости без большой погрешности также может быть определена по формуле (13).

В соответствии с законом Дарси скорость движения жидкости в капилляре радиуса r_0 пропорциональна градиенту давления и равна

$$\frac{dx}{d\tau} = -\frac{k_1}{\eta} \cdot \frac{dP}{dx}, \quad (14)$$

где k_1 – коэффициент проницаемости, м².

Градиент давления в капилляре выразим через капиллярное давление:

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{P_k}{x}, \quad (15)$$

где P_k – капиллярное давление, которое по уравнению Лапласа равно

$$P_k = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r_0}. \quad (16)$$

После подстановки уравнений (15) и (16) в формулу (14) и приравнивания правой части полученного выражения к правой части формулы (13) определяем коэффициент проницаемости одиночного капилляра радиуса r_0 :

$$k_1 = \frac{r_0^2}{8} = \frac{1}{8 \cdot \pi} \cdot \pi \cdot r^2, \quad (17)$$

который прямо пропорционален площади поперечного сечения этого капилляра.

Перепишем уравнение (9) с учетом формулы (17) и получим зависимость для расчета коэффициента проницаемости пористого материала с взаимопроницающими компонентами:

$$k = \frac{r_0^2}{8} \cdot c^2. \quad (18)$$

После приравнивания правых частей уравнений (5) и (18) и учета зависимости (10) формула для оценки коэффициента извилистости пор и капилляров, участвующих в переносе жидкости, записывается в виде

$$\xi = \frac{\Phi}{c^2} = \Phi \cdot \left\{ \frac{1}{2} + \sin \left[\frac{\arcsin 2 \cdot \Phi - 1}{3} \right] \right\}^{-2}. \quad (19)$$

К такому же уравнению можно прийти при использовании соотношения проницаемостей пористых сред, приведенного в работе [8]. Для потока влаги сквозь пористую среду имеем соотношение:

$$\frac{\text{проницаемость среды при } \Phi < 1}{\text{проницаемость среды при } \Phi = 1} = \frac{\Phi}{\xi}, \quad (20)$$

где Φ – часть открытой пористости Π , которая участвует в переносе жидкой или парообразной влаги ($0 \leq \Pi \leq 1$).

При капиллярном переносе влаги согласно формуле (9) проницаемость среды k при $\Phi = 1$ составляет $k = k_1$. Если $\Phi < 1$, то $k = k_1 \cdot c^2$. Тогда формула (20) приобретает вид:

$$\frac{k_1 \cdot c^2}{k_1} = \frac{\Phi}{\xi}. \quad (21)$$

В результате, как и в уравнении (19), коэффициент извилистости $\xi = \Phi / c^2$.

Из соотношения (20) следует, что поток пара сквозь пористое тело с влагосодержанием $w < w_c$ проходит через поры, характеризуемые коэффициентом извилистости

$$\xi = \frac{\delta_0}{\delta_p} \cdot \Phi, \quad (22)$$

где δ_p и δ_0 – коэффициенты паропроницаемости пористой среды и воздуха, кг/(м·с·Па); $\Phi = \Pi - \frac{w}{\rho}$ при $w \leq w_c$.

Поскольку δ_0 известно (например, при температуре 293 К $\delta_0 = 1,9 \cdot 10^{-10}$ кг/(м·с·Па)), то с помощью эксперимента можно определить δ_p , а затем по формуле (22) вычислить извилистость ξ . Однако, как свидетельствуют опытные данные, приведенные в работе [9], и теоретический анализ работы [10], может оказаться, что в некоторых случаях (мелкопористые материалы) $\delta_0 < \delta_p$ и $\xi < 1$. Это объясняется тем, что наряду с диффузией пара имеет место перенос влаги в жидкой фазе. На такие особенности измерения коэффициента паропроницаемости δ_p стандартными методами обращается внимание и в Европейской норме [11]. Поэтому и в границах сорбционного увлажнения материала при определении ξ нужно исходить из того, что $\delta_0 = k_1$, а $\delta_p = k_1 \cdot c^2$, и пользоваться формулой (19).

Сравнительный анализ полученной зависимости. Сравним полученную формулу (19) с некоторыми формулами, предлагаемыми для определения коэффициента извилистости капилляров. Так,

в работе [3] коэффициент извилистости пор (без каких либо пояснений) предлагается определять следующим образом:

$$\xi = \left(\frac{1 - \Phi_c}{\Phi - \Phi_c} \right)^{0.4} \quad \text{при } \hat{O} \geq 0,2, \quad (23)$$

$$\xi = \text{const} = 3 \quad \text{при } \hat{O}_n < \hat{O} < 0,2.$$

Наибольшую неопределенность при расчетах по этой формуле вносит значение пористости Φ_c , которая принимается равной 0,15. Считается [3], что при $\Phi_c \leq 0,15$ жидкость (проводящая компонента) не образует в поровом пространстве бесконечного кластера и перенос жидкой влаги отсутствует. Отметим, что для ряда стеновых материалов даже в состоянии капиллярного водонасыщения объем пор $\Phi = \Phi_a$, заполненных водой, не превышает 0,15. Возможно, при построении формулы (23) учитывались пористые среды, имеющие активную пористость $\Phi_a > 0,15$.

Рассмотрим еще одну формулу для определения коэффициента извилистости, которая получена по результатам наблюдений за перемещаемым под давлением потоком жидкости в зернистых средах и приведена в работе [12]:

$$\xi = 1 + P \cdot \ln \left(\frac{1}{\Phi} \right), \quad (24)$$

где P – коэффициент, аппроксимирующий экспериментальные данные (например, для среды из сферических частиц $P = 0,41$, в случае кубических частиц $P = 0,63$); Φ – пористость.

Основным недостатком формулы (24) является то, что она применима для узкого круга пористых сред и расширение этого круга требует все новых и новых экспериментов. Тем не менее отмечается [12], что формула (24) заслуживает применения при исследовании процессов переноса влаги.

Сравнение представленных здесь формул для определения коэффициента извилистости капилляров ξ между собой, а также с экспериментальными данными, заимствованными из работы [8], показаны на рисунке 2. Приведенные на этом рисунке данные были получены с помощью измерения электрической проводимости образцов, поровое пространство которых насыщалось солевым раствором. В качестве пористых сред рассматривались зернистые среды, состоящие из моно- и полидисперсных стеклянных частиц размером от 1 до 8 мм, стеклянного порошка и кварцевого песка с частичками 120 – 210 мкм, а также образцы песчаника и известняка, имеющие довольно однородную пористую структуру.

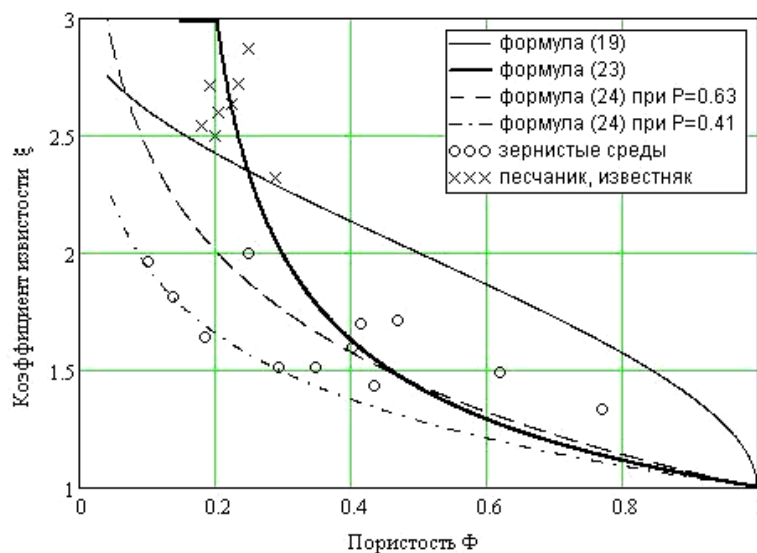


Рис. 2. Зависимость коэффициента извилистости капилляров от пористости Φ , участвующей в капиллярном или фильтрационном переносе жидкой влаги, и экспериментальные данные: \circ – при фильтрационном потоке; \times – при капиллярном переносе влаги

Из рисунка 2 следует, что при одинаковой пористости из диапазона $0,18 \leq \Phi \leq 0,29$ коэффициент извилистости капилляров каменных материалов значительно превышает таковой для зернистых сред. Очевидно, что такое соотношение сохраняется и при других значениях пористости. Как и ожидалось, формула (24) удовлетворительно предсказывает опытные данные для зернистых сред из сферических ($P = 0,41$) и кубических ($P = 0,63$) частичек. Формулы (19) и (23) неплохо предсказывают опытные данные для каменных мате-

риалов, имеющих довольно узкий диапазон пористости $0,18 \leq \Phi \leq 0,29$. Можно предположить, что в данном диапазоне пористости подобные результаты будут наблюдаться и для других строительных материалов, имеющих однородную пористую структуру. Однако формула (23) будет недопредсказывать опытные данные при высокой пористости $\Phi > 0,3$, а ее применение при малых значениях пористости $\Phi \leq 0,15$ просто не предусмотрено. Представляется, что в таком случае из трех рассмотренных формул предлагаемая формула (19) является наиболее предпочтительной для расчета коэффициента извилистости капилляров строительных материалов, пористую структуру которых приближенно можно считать изотропной и однородной. Однако не все изделия строительных материалов могут удовлетворять этому условию. В некоторых случаях готовые изделия имеют слоистую текстуру, которая приводит к анизотропии свойств. При этом коэффициент извилистости капилляров в направлении, перпендикулярном слоям, будет значительно больше, чем вдоль слоев. Это обстоятельство нужно учитывать при использовании формулы (19) соответствующими поправками.

Заключение. Предложена зависимость для определения коэффициента извилистости капилляров строительных материалов однородной и изотропной пористой структуры в направлении потока влаги, полученная с помощью теории обобщенной проводимости и капиллярной теории. Выполнен сравнительный анализ предлагаемой теоретически обоснованной формулы с другими формулами, включающими эмпирические коэффициенты, и экспериментальными данными. Анализ показал, что предлагаемая зависимость является наиболее предпочтительней при определении указанной геометрической характеристики, применяемой при расчетах процессов переноса влаги в капиллярно-пористых материалах строительных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев, Л.Л. Теплофизические свойства пористых материалов / Л.Л. Васильев, С.А. Танаева. – Минск: Наука и техника, 1971. – 266 с.
2. Дульнев, Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: справ. кн. / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
3. Дульнев, Г.Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г.Н. Дульнев, В.В. Новиков. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 247 с.
4. Лыков, А.В. Теплообмен: справочник / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 479 с.
5. Никитин, В.И. Влияние температуры обжига на параметры пористой структуры керамики / В.И. Никитин, Б. Бацкель-Бжозовска // Вестн. БрГТУ. – 2005. – № 2: Стр-во и архитектура. – С. 98 – 103.
6. Janz, M. Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels / M. Janz. – Lund: Division of Building Materials, 1997. – 76 p. – (Report TVBM-3076).
7. Никитин, В.И. Прогнозирование морозостойкости стеновой керамики на основе показателей капиллярного впитывания воды / В.И. Никитин, Б. Бацкель-Бжозовска // Вестн. БрГТУ. – 2008. – № 1: Стр-во и архитектура. – С. 132 – 135.
8. Carman, P.C. Flow of gases through porous media / P.C. Carman. – London: Butterworths, 1956. – 179 p.
9. Epstein, N. On tortuosity and the tortuosity factor in flow and diffusion through porous media / N. Epstein // Chem. Eng. Sci. – 1989. – Vol. 44(3). – P. 777 – 779.
10. Афонин, А.В. Вычисление паропроницаемости капиллярно-пористых материалов с учетом течения сорбционных пленок и конденсата / А.В. Афонин, В.И. Никитин // Вестн. БрГТУ. – 2003. – № 1: Стр-во и архитектура. – С. 34 – 40.
11. Ciepłno-wilgotnościowe właściwości użytkowe budynków i materiałów budowlanych. Wielkości fizyczne dotyczące przenoszenia masy. Słownik: PN-EN ISO 9346:2009. – Data zatwierdzenia 22.04.09.
12. Jianchao, C. A discussion of the effect of tortuosity on the capillary imbibition in porous media / C. Jianchao, Y. Boming // Transp. Porous Media. – 2011. – № 89(2). – P. 251 – 263.

Поступила 31.05.2012

DETERMINATION OF THE COEFFICIENT OF TORTUOSITY CAPILLARIES BUILDING MATERIALS IN THE CALCULATION OF MOISTURE TRANSFER

V. NIKITIN, V. KOFANOV

A one-dimensional moisture flow through the body with sinuous capillaries was considered and on the basis of the theory of generalized conductivity and capillary theory the formula for determining the coefficient of tortuosity was obtained. The comparative analysis of the proposed formulas with other formulas, including empirical coefficients was performed and experimental data were obtained for the granular media and stone materials. It is proposed to take into account the tortuosity of the capillaries in determination of the coefficient of moisture transfer in capillary-porous building materials.