

карнизных узлов гнутоклееных рам. Современная методика должна включать в себя не только формулы для более точного определения отдельных напряжений, но и условия, которые должны учитывать сложное напряженное состояние, в котором находится клееная древесина в зоне карнизного узла.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Руководство по проектированию клееных деревянных конструкций, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1977. – 192 с.
2. Деревянные конструкции: СНиП II-25-80. – М.: Стройиздат – Госстрой СССР, 1982. – 66 с.
3. Светозарова, Е.И. Опыт проведения испытания клееных рам пролетом 18 м / Е.И. Светозарова, Е.Н. Серов, С.А. Душечкин, В.Д. Попов // Повышение надежности и долговечности строительных конструкций: Межвуз. темат. сб. тр. – Л.: ЛИСИ. – 1972. – С. 97–114.
4. Капш, Э.А. Деревянные конструкции в современном строительстве / Э.А. Капш, Е.Н. Серов. – Кишинев: Штеница, 1981. – 180 с.
5. Разработка, исследование и оказание научно-технической помощи во внедрении клееных конструкций с применением водостойкой фанеры и древесины, и древесины различных пород в с/х строительстве УССР: Отчет по научно-исследовательской работе ЛИСИ, науч. руководитель Е.И. Светозарова. – Л., 1976. – Т. I. – 219 с.
6. Серов, Е.Н. Конструкции из дерева и пластмасс: метод. указания по расчету трехшарнирных деревянных рам по деформированной схеме на ЭЦВМ «Наири-2». – Л.: ЛИСИ, 1977. – 51 с.
7. Курганский, В.Г. Влияние анизотропии на напряженное состояние кривого бруса в случае чистого изгиба: тр. ЦНИИСК им. Кучеренко / В.Г. Курганский, Н.М. Кузнецова. – М., 1981. – С. 148–155.
8. Освенский, Б.А. Исследование напряженного состояния гнутоклееного деревянного элемента и конструкции // Вопросы прочности, долговечности и деформативности древесины и конструктивных пластмасс: сб. тр. № 186 / Б.А. Освенский, Н.М. Кузнецова МИСИ им. Куйбышева. – М., 1981. – С. 13–18.
9. Пособие по проектированию деревянных конструкций (к СНиП II-25-80) / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1986. – 216 с.
10. Серов, Е.Н. Расчет цельноклееного карнизного узла рамы. Краткие содержания докладов XXVIII научной конференции ЛИСИ. – Л.: ЛИСИ, 1970. – С. 161–164.
11. Серов, Е.Н. Проектирование деревянных конструкций: учеб. пособие / Е.Н. Серов, Ю.Д. Санников, А.Е. Серов; под. ред. Е.Н. Серова. – М.: Издательство АСВ, 2011. – 236 с.
12. Найчук, А.Я. Некоторые особенности расчета клееных деревянные конструкций: сб. науч. тр. Междунар. Симпозиума / А.Я. Найчук, Е.Н. Серов, И.Ф. Захаркевич – Брест: ОАО «Брестская типография», 2009. – С. 205–211.
13. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-161:2010 – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – С. 34–37.
14. Еврокод 5. Проектирование деревянных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1995-1-1-2009 (02250). – С. 29–31.

Никитин В.И., Бацкель-Бжозовска Б.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАДИУСА СТЕНОВЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КАПИЛЛЯРНОМ ПЕЕРОНОСЕ ВЛАГИ

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучении процесса переноса жидкости в пористых средах, в том числе и в капиллярно-пористых материалах, является одной из наиболее сложных проблем гидродинамики, что объясняется неопределённостью границ потока жидкости и её свойств в пористой среде и случайным характером распределения в ней пор и капилляров. В связи с такой сложностью при анализе процессов переноса жидкой влаги в капиллярно-пористых материалах используются разнообразные модельные представления их пористой структуры.

Ещё в 1921 году Вашбурн (Washburn) [1], цитируется по работам [2,3], теоретически описал кинетику подъёма жидкости в капиллярной трубке и предложил пористость материалов представлять в виде пучка параллельных трубок (капилляров) одинакового радиуса. В дальнейшем такую простую структуру пористой среды будем называть идеальной. Используются также более сложные модели, состоящие из сферических частиц одинакового размера, пересекающихся капилляров круглого или квадратного сечения, параллельных пластин и т.д. [4,5,6]. Для перехода от рассматриваемой модели к идеальной можно воспользоваться теорией гидравлического радиуса Козени [4], согласно которой гидравлический радиус равен отношению значения двух пористостей к удельной поверхности пор материала или его модельного представления. В строительстве этот радиус используется при расчётах влагопереноса в ограждающих конструкциях зданий из капиллярно-пористых материалов.

В случае упомянутых модельных представлений реальной пористой структуры гидравлический радиус можно определить аналитически. При одинаковой пористости и размерах элементарных ячеек значения гидравлических радиусов для различных моделей будут отличаться. Так, при переходе от модели из одинаковых сферических частиц с их кубической упаковкой к модели с пересекающимися капиллярами квадратного поперечного сечения гидравлический радиус увеличивается на 5%.

Для реальных строительных материалов аналитическое определение гидравлического радиуса в настоящее время практически невозможно. Поэтому для определения гидравлического радиуса часто используются эмпирические методы, например, ртутная порозиметрия. Однако непосредственное использование гидравлического радиуса, полученного с помощью ртутной порозиметрии, при расчётах по идеальной модели приводит к тому, что результаты расчётов существенно отличаются от опытных данных. Например, рассчитанный коэффициент сорбции воды превышает его опытное значение в несколько раз. Следовательно, гидравлический радиус, найденный с помощью ртутной порозиметрии, может превышать радиус, определяющий гидравлическую проводимость материала, в десятки раз. Поэтому предпринимаются попытки, описанные в ряде работ [2,3,7], скорректировать результаты ртутной порозиметрии путём учёта дополнительных геометрических параметров пористой структуры материалов, влияющих на результирующий поток впитываемой жидкости. Тем не менее, и модифицированные модели не всегда достаточно точно предсказывают экспериментальные данные.

В данной работе выполнен анализ существующих зависимостей, описывающих кинетику впитывания жидкости пористой средой, базируется на идеальной модели и данных ртутной порозиметрии, а также показаны их недостатки. Из условия совпадения кинетики одномерного капиллярного впитывания воды реальным материалом и его идеальной моделью получена зависимость для определения гидравлического радиуса идеальной модели. Разработан метод определения гидравлического радиуса стеновых строительных материалов, основанный на корректировке идеальной модели путём учёта отличительных особенностей впитывания влаги рассмотренным материалом.

2. ЭМПИРИЧЕСКОЕ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КАПИЛЛЯРНОГО ВПИТЫВАНИЯ ЖИДКОСТИ. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАДИУС ИДЕАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

На основании многочисленных экспериментальных данных известно, что для ряда капиллярно-пористых строительных материалов (строительная керамика, силикатные материалы, строительные растворы, пенобетон и т.д.) кинетика

одномерного капиллярного впитывания воды может быть описана простой эмпирической зависимостью:

$$W(t) = A\sqrt{t}, \quad (1)$$

где $W(t)$ – масса воды, впитанная сухим материалом за время t через единичную поверхность контакта с водой, $\text{кг}/\text{м}^2$;

A – коэффициент сорбции воды (согласно европейской нормы [8]), $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^{0,5})$.

В экспериментах по определению коэффициента A используются образцы сухого материала массой m_0 обычно в виде призмы или прямого цилиндра высотой h и площадью поперечного сечения a . Процесс капиллярного впитывания воды образцами изучаемого материала отслеживается с заданным шагом по времени Δt путём измерения прироста массы образца $\Delta m(t) = m(t) - m_0$. Тогда масса воды, впитанная образцом через единичную поверхность контакта с водой к моменту времени t , составит:

$$W(t) = \Delta m(t) / a. \quad (2)$$

В результате анализа опытных значений $W(t)$, определённых по формуле (2) от момента контакта нижней грани образца с поверхностью воды ($t=0$, $W(0)=0$) до момента достижения поднимающимся фронтом воды верхней грани образца ($t=t_k$, $W(t_k)=W_k$), устанавливались значения коэффициента сорбции воды A и влагосодержание материала в состоянии капиллярного насыщения w_k ; $\text{кг}/\text{м}^3$.

Графическая интерпретация процедуры определения значений A и w_k показана на рисунке 1. Дополнительные особенности метода определения значений A и w_k среди прочих представлены в работах [9,10].

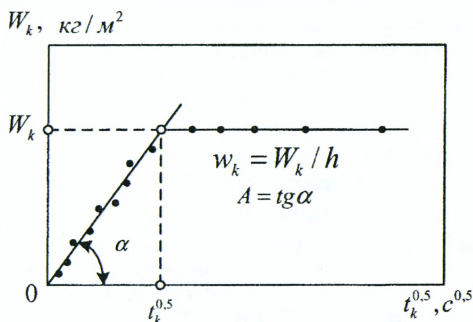


Рисунок 1 – Определение коэффициента сорбции воды A и влагосодержания материала в состоянии капиллярного насыщения w_k , по данным о кинетике одномерного впитывания воды (точки) высотой h и постоянного поперечного сечения a

Если разделить влагосодержание материала w_k на плотность воды ρ , то получим значения пористости материала, которая принимает участие в капиллярном переносе воды

$$\Phi_a = w_k / \rho \quad (3)$$

Эту пористость принято называть активной пористостью, и её значение не может превышать значения открытой пористости P .

Следует отметить, что достаточно просто определяемые значения A , w_k и Φ_a , характеризующие способность гидрофильных капиллярно-пористых материалов впитывать воду в заданном направлении, в настоящее время широко используются при расчётах процессов нестационарного влагопереноса в материалах ограждающих конструкций зданий.

Как уже отмечалось, кинетика высоты подъёма жидкости $y(t)$, смачивающей стенки капилляра радиуса r , описывается зависимостью Ванбурна

$$y(t) = \sqrt{\frac{r\sigma \cos \theta}{2\eta} \cdot t}, \quad (4)$$

где σ – поверхностное натяжение на границе фаз газ-жидкость, Н/м;

η – динамическая вязкость смачивающей жидкости, Па·с;

θ – угол смачивания.

Представим активную пористость испытываемого материала в виде пучка параллельных трубок (капилляров) одинакового радиуса r (идеальная модель). С учётом зависимостей (4) массу воды, впитанную этим капиллярами за время t , можно определить по формуле

$$W(t) = \Phi_a \rho \sqrt{\frac{r\sigma \cos \theta}{2\eta} \cdot t}. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что точность предсказания кинетики капиллярного впитывания по ней зависит от того, насколько правильно заданы значения физических свойств смачивающей жидкости (σ, η, ρ), геометрических параметров пористой структуры материала (Φ_a, r) и меры его смачиваемости ($\cos \theta$). Значения σ, η, ρ обычно принимаются по справочным данным. Для определения значений Φ_a, r и θ потребуются эксперименты. Больше всего трудностей связано с определением радиуса r , который фактически должен учитывать ряд особенностей переноса жидкости в реальной пористой структуре. Некоторые из существующих подходов к определению радиуса r , входящие в формулу (5), описаны в работах [2,7]. Согласно [7] для определения r достаточно иметь данные ртутной порозиметрии, воспользоваться распределением объёма пор по радиусам, отыскать медиану этого распределения r_v (медиальная оценка радиуса пор) и учесть извилистость капилляров, определяемой по предлагаемой авторами формуле. В отличие от этого метода в работе [2] радиус r_v заменяется на эффективный радиус r_{eff} , определяемый с использованием распределения объёма пор по радиусам и теории приближённой эффективности среды (англ. EMA – effective medium approximation). Кроме того с помощью авторской методики предлагается учитывать изменение формы поперечного сечения капилляров.

При использовании рассмотренных в работах [2,7] методов потребуется дорогостоящая аппаратура, длительные и трудоёмкие измерения и вычисления, а результаты расчётов показывают, что получить достаточно точное описание процесса капиллярного впитывания воды не удаётся. Представляется, что задача определения радиуса r в формуле (5) может быть решена достаточно просто и точно с помощью экспериментальных данных о кинетике одномерного впитывания жидкости, описываемой эмпирической моделью (1).

Итак, если значения показателей, входящих в правую часть формулы (5), достаточно точны, то для рассматриваемого материала точность описания кинетики капиллярного впитывания жидкости по электрической (1) и идеальной (5) моделям должны совпадать. Это возможно при выполнении условия

$$A = \Phi_a \rho \sqrt{\frac{r \sigma \cos \theta}{2\eta}} \quad (6)$$

Перепишем данное условие с учетом формулы (3) в следующем виде

$$\left(\frac{A}{W_k}\right)^2 = \frac{r \sigma \cos \theta}{2\eta} \quad (7)$$

Отметим, что параметры левой части этой формулы отражают кинетику капиллярного впитывания жидкости и играют важную роль при расчетах влагопереноса в строительных материалах ограждающих конструкций [11, 12].

Использование формулы (7) или (6) позволяет определить значение радиуса капилляров идеальной модели, при котором кинетика одномерного капиллярного впитывания воды исследуемым материалом и его идеальной модели совпадут. Значение этого радиуса определяется из соотношения

$$r_i = \left(\frac{A}{W_k}\right)^2 \frac{2\eta}{\sigma \cos \theta} \quad (8)$$

В дальнейшем радиус r_i будем называть гидравлическим радиусом идеальной модели и покажем как перейти от значения этого радиуса к значению гидравлического радиуса рассматриваемых строительных материалов.

3. ИДЕАЛЬНЫЙ РАДИУС И ДАННЫЕ РТУТНОЙ ПОРОЗИМЕТРИИ

Как следует из анализа данных работ [2, 7], радиус идеальной модели, рассчитанный по формуле (8) для образцов глиняного кирпича, силикатных изделий и природных каменных материалов, оказался значительно меньше (в десятки и даже сотни раз) значения условного радиуса пор r_v , при котором вдавливаемая позиметром ртуть заполняет половину общего объема открытых пор (медиальная оценка). При этом ртуть вдавливается в небольшие кусочки материала общей массой в несколько граммов (3-6 г). Принимается, что поры открыты с двух сторон и имеют форму цилиндров, условные радиусы которых r определяются на основе зависимости Лапласа

$$r = \frac{2\sigma \cos \theta}{p} \quad (9)$$

где p – прикладываемое внешнее давление, Па; σ и θ – поверхностное натяжение и угол смачивания для ртути.

Выполнив в условиях нарастающего давления ряд измерений объема вдуваемой в поры материала ртути, можно определить открытую пористость P (объем пор в единице объема материала) и их удельную поверхность $S_v, м^{-1}$ (поверхность пор в единице объема материала), распределение объема открытых пор в зависимости от их радиуса, уже упомянутый радиус пор r_v (медиальная оценка), средний радиус пор r_k (гидравлический радиус Козени), определяемый из соотношения

$$r_k = 2P/S_v, \quad (10)$$

а также другие оценки поровой структуры материала.

Представляло интерес для образцов керамического и силикатного материалов сравнить открытую P и активную Φ_a пористости, значения радиуса иде-

альной модели r_i , определяемого по формуле (8), со значениями упомянутых радиусов r_v и r_k , найденными с помощью ртутной порозиметрии. Отметим, что в первую очередь нас будет интересовать гидравлический радиус r'_k , связанный с активной пористостью и используемый при определении коэффициентов влагопереноса в пористых строительных материалах [12].

Для сравнительных испытаний использовались керамические образцы, изготовленные в лабораторных условиях, а также образцы, вырезанные из глиняных и силикатных кирпичей промышленного производства.

Лабораторные образцы – сырцы в виде кубиков со стороной 5 см формовались пластическим способом из сырьевой смеси, содержащей 85 % легкоплавкой глины (по массе сухого вещества) и 15 % среднезернистого кварцевого песка, 96 % зерен которого имели размер от 0,06 до 1,0 мм. После сушки в естественных условиях сформованные образцы нагревались в электрической печи до максимальной температуры обжига, выдерживались при этой температуре 2 часа и затем охлаждались вместе с печью. Для обеспечения изменчивости характеристик поровой структуры керамического материала было реализовано пять вариантов обжига образцов, отличающихся либо значением скорости нагрева, либо значением максимальной температуры обжига. По каждому из пяти вариантов обжигалось по пять образцов-сырцов. Условия этого эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Условия обжига лабораторных образцов-сырцов

Образцы	Скорость нагрева, °C/мин	Максимальная температура обжига, °C
L 1	1	850
L 2	3	850
L 3	2	950
L 4	1	1050
L 5	3	1050

После обжига для всех образцов в табличной и графической форме фиксировалась кинетика одномерного капиллярного впитывания воды (см. рис. 1), которая использовалась для определения коэффициента сорбции воды A , влагосодержания образцов в состоянии капиллярного насыщения w_k и активной пористости Φ_a .

Промышленные образцы, вырезанные из глиняных и силикатных кирпичей, имели вид параллелепипеда с усредненными размерами 58x65x250 мм. Перед отслеживанием кинетики капиллярного впитывания воды образцы сушились до постоянной массы при температуре 105 °C. Процесс капиллярного впитывания воды протекал вдоль наибольшего размера образцов, по завершении которого также определялись параметры A , w_k и Φ_a . Было испытано 4 образца глиняных кирпичей (ГК) и 4 образца силикатных кирпичей (СК).

Затем для рассмотренных образцов керамического и силикатного материалов по формуле (8) были рассчитаны значения радиусов идеальной модели r_i . При этом угол смачивания θ , как и в работах [2,9], принимался равным нулю (идеальное смачивание, при котором радиус смачиваемого капилляра и мениска совпадают), поверхностное натяжение для воды при 20 °C составляло $\sigma=0,07275 \text{ Н/м}$, а вязкость $\eta=1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па с}$ [9].

Далее с помощью ртутной порозиметрии для каждой серии образцов по двум пробам были определены ранее упомянутые характеристики пористой структу-

ры и в том числе значения радиусов r_v и r_k , которые сравнивались с радиусами идеальной модели. Ртутный порозиметр развивал давление до 200 МПа и позволял определять условный радиус пор от 3,6 нм до 300 нм. При использовании формулы (9) для ртути принималось: поверхностное натяжение $\sigma=0,4667$ Н/м, угол смачивания $\theta=142^\circ$.

Основные результаты выполненного исследования приведены в таблице 2. Как следует из этой таблицы, изменчивость данных, характеризующих капиллярные свойства и пористую структуру образцов, оказалась существенной. Как и ожидалось, варьирование скорости нагревания и максимальной температуры обжига для лабораторных образцов привело к изменению средних значений коэффициента A от 0,0656 до 0,1247 кг/(м²·с^{0,5}), радиусы r_v от 100 до 185 нм, а радиуса r_k – от 39 до 72 нм.

Статистический анализ данных для лабораторных образцов показал, что стандартное отклонение для средних значений коэффициента A составляет $S_A = 3,51 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с^{0,5}) при степенях свободы $\nu = 20$. В рассмотренном факторном пространстве при уровне значимости $\alpha = 0,05$ установлены статически значимые линейные эффекты варьируемых факторов, которые дают основания утверждать, что коэффициент сорбции воды A увеличивается с повышением скорости нагревания от 1 до 3°C/мин и уменьшением максимальной температуры обжига от 1050 до 850 °C. Для средних значений радиуса r_v при $\alpha = 0,05$, $S_r = 12,57$ нм и $\nu = 5$ можно признать статически значимым только линейный эффект увеличения радиуса r_v с повышением максимальной температуры обжига с 850 до 1050°C.

Таблица 2 – Среднее значение плотности (ρ_0), коэффициента сорбции воды (A), влагосодержание материала в состоянии капиллярного насыщения (w_k), открытой пористости (P), отношения активной пористости к открытой (Φ_a / P), медиального радиуса (r_v) и гидравлического радиуса (r_k) материала и радиуса его идеальной модели (r_i), а также их соотношения (r_v / r_k , r_v / r_i , r_k / r_i)

Образцы	ρ_0 , г/см ³	A , кг/(м ² ·с ^{0,5})	w_k , кг/м ³	P	Φ_a / P	r_v , нм	r_k , нм	r_v / r_k	r_i , нм	r_v / r_i	r_k / r_i
L 1	1,88	0,0835	254	0,304	0,83	100	39	2,56	2,98	33,56	13,09
L 2	1,89	0,1069	262	0,303	0,86	108	43	2,51	4,58	23,58	9,39
L 3	1,87	0,1247	259	0,298	0,87	145	63	2,30	6,38	22,73	9,87
L 4	1,96	0,0709	204	0,273	0,75	160	64	2,50	3,32	48,19	19,28
L 5	1,98	0,0656	198	0,244	0,81	185	72	2,57	3,02	61,26	23,84
ГК	1,78	0,0650	265	0,334	0,79	178	70	2,54	1,65	107,88	42,42
СК	1,73	0,0628	258	0,316	0,82	93	23	4,04	1,63	57,06	14,11

При сравнительном анализе выяснилось, что для рассмотренных образцов отношение активной пористости Φ_a к открытой пористости P изменяется в довольно узком диапазоне – от 0,75 до 0,87. По экспериментальным данным ряда работ [13,14,15,16], полученным для различных материалов (изделия строительной керамики, природные камни, строительные растворы), отношение Φ_a / P изменяется от 0,37 до 0,98.

Следует отметить, что гидравлический радиус пор r_k оказался в несколько раз меньше медиальной оценки радиуса r_v . Для образцов керамического мате-

риала отношения r_v / r_k находится в пределах от 2,30 до 2,57, а для образцов силикатного кирпича оно достигло значения 4,04. Расчеты с использованием данных работы [7] для образцов глиняного кирпича показали, что указанное отношение изменяется в более широком диапазоне (от 1,26 до 5,38). Значения радиуса r_k от 9,34 до 42,3 раз превышает значения радиуса идеальной модели r_i . Отношение медиальной оценки радиуса пор r_v к радиусу r_i имеет более высокие значения. Как видно из таблицы 2, это отношение изменяется от 22,73 до 107,88.

Таким образом, между радиусом идеальной модели r_i , рассчитанным по формуле (8), полученной из условия совпадения кинетики капиллярного впитывания воды реальным материалом и его идеальной модели, и оценками радиуса пор материала r_v и r_k , полученными с помощью ртутной порозиметрии, наблюдается большая разница. Далее делается попытка объединить причины такой разницы и на этой основе разработать зависимость для перехода от радиуса идеальной модели r_i к гидравлическому радиусу материала r'_k , используемому при определении коэффициента капиллярного влагопереноса и определяемому из соотношения

$$r'_k = \frac{2\Phi_a}{S'_v}, \quad (11)$$

где S'_v – удельная поверхность активной пористости, м^{-1} . В настоящее время определить значение удельной поверхности S'_v не представляется возможным, поэтому следует искать другие подходы для оценки значения радиуса r'_k .

4. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КАПИЛЛЯРНОЕ ВПИТЫВАНИЕ ЖИДКОСТИ, И МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАДИУСА

Начнем с рассмотрения ранее упомянутых моделей (от простой до наиболее сложной), предложенных для определения коэффициента сорбции воды A и позволяющих обсуждать некоторые факторы, учитываемые при переходе от данных ртутной порозиметрии к идеальному радиусу r_i .

В работе [7] оценена способность наиболее простой модели прогнозировать коэффициент сорбции воды A образцов глиняного кирпича. Эта модель имеет следующий вид:

$$\hat{A} = P\rho \sqrt{\frac{r_v}{\xi^2} \cdot \frac{\sigma \cos \theta}{2\eta}}, \quad (12)$$

где введено новое обозначение ξ – коэффициент извилистости капилляров, который можно определить, если при одномерном влагопереносе сквозь пористое тело толщиной L известна средняя длина траектории частицы влаги l . Тогда $\xi = l / L$.

Для определения этого коэффициента в работе [7] предложена следующая зависимость:

$$\xi = \frac{r_v \cdot S_v}{2P}, \quad (13)$$

где S_v – удельная поверхность открытых пор, м^{-1} .

Отметим, что с учётом формулы (10) зависимость (13) примет вид:

$$\xi = r_v / r_k. \quad (14)$$

Следовательно, отношение r_v / r_k , представлено в таблице 2, в соответствии с работой [7] оценивает извилистость капилляров открытой пористости P .

При расчётах по формуле (12) использовалось среднее опытное значение угла смачивания, которое для испытываемых образцов керамического материала составляло $\theta = 87^\circ$. Было принято, что при температуре 20°C физические свойства воды имели следующие значения: $\rho = 998 \text{ кг/м}^3$; $\sigma = 72,7 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$; $\eta = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. В этом случае формула (12) могла бы достаточно точно прогнозировать опытное значение коэффициента A , если бы соотношение $r_v \cdot \cos\theta / \xi^2$ имело значение, близкое, радиусу идеальной модели r_i .

Расчёты показали, что несмотря на низкую смачиваемость керамической поверхности ($\cos\theta = 0,0523$) и довольно высокие значения коэффициента извилистости ($1,3 \leq \xi \leq 5,4$), значения коэффициента сорбции воды \hat{A} , найденные по формуле (12), превышают опытное значение A в среднем в 4,72 раза. Это означает, что в формуле (12) значения геометрических параметров пористой структуры и физических свойств перемещающейся в ней воды нуждаются в корректировке. Отметим, что в формуле (12) вместо открытой пористости P следует использовать активную пористость Φ_a ($P > \Phi_a$). Большие сомнения вызывает использование радиуса r_v . По данным работы [17], возможны коррективы вязкости воды η , перемещающейся в мелких капиллярах.

Более сложная модель, которую в работе [2] предлагают использовать для прогнозирования коэффициента сорбции воды природных камней, имеет вид:

$$\hat{A} = Pp \sqrt{\frac{r_{eff} \cdot \delta}{\xi^2} \cdot \frac{\sigma \cos\theta}{2\eta}} \quad (15)$$

Здесь введены новые обозначения:

r_{eff} – эффективный радиус пор,

δ – фактор формы пор.

При расчётах по формуле (15) авторы работы принимали: $\xi = 1,73$ и $\cos\theta = 1$. В таком случае после замены открытой пористости P на активную Φ_a точность предсказания коэффициента сорбции по формуле (15) зависит от того, насколько значение отношения $r_{eff} \cdot \delta / \xi^2$ близко значению радиуса r_i , определяемому по формуле (8).

Фактор формы δ капилляра не круглого поперечного сечения определяется путём делением его гидравлического радиуса на гидравлический радиус капилляра круглого поперечного сечения. При этом сравнимые капилляры имеют одинаковые площади поперечных сечений и топологические свойства их форм. В результате, например, для капилляра квадратного поперечного сечения $\delta = 0,89$, для капилляра поперечного сечения в виде плоского овала с отношения большего размера к меньшему, равному 9, имеем $\delta = 0,55$ и т.д. В качестве недостатка отметим, что определение фактора формы связано с длительными и трудоёмкими измерениями. По нашему мнению, введение фактора формы δ в зависимость (15) недостаточно обосновано, так как при использовании данных ртутной порозиметрии учитывается расчётами по формуле (9) (капилляр произвольной формы поперечного сечения приводится к капилляру кругового сечения). Правильнее было бы учитывать эффект «сужения-расширения» капилляра на пути движения жидкости, который рассматривается, например, в работах [18,19] и приводит к заметному уменьшению коэффициента сорбции воды A .

Эффективный радиус r_{eff} определяется из условия, полученного с помощью приближенной эффективной среды (ЕМА),

$$\sum_{j=1}^N \frac{g_{eff}(r_{eff}) - g_j(r_j)}{g_j(r_j) + [(z/2) - 1] g_{eff}(r_{eff})} = 0, \quad (16)$$

где N – общее число круглых цилиндрических капилляров,

$g_j(r_j)$ – гидравлическая проводимость j -го капилляра радиуса r_j , значение которой пропорционально r_j^4 ,

z – среднее пространственное координационное число (англ. – spatial average coordination number), которое характеризует топологию порового пространства и может принимать значение из диапазона $2 \leq z \leq \infty$.

При заданном числе z из уравнения (16) с помощью итерационного метода Ньютона находится эффективная гидравлическая проводимость пористой среды $g_{eff}(r_{eff})$ и определяется эффективный радиус r_{eff} . Для образцов керамического материала $L1$, $L3$ и $L4$ нами с использованием формулы (16) при $z = 2$ были определены эффективные радиусы. В результате для образца $L1$ получим $r_{eff}(z = 2) = 33,06$ нм, для образца $L3$ – $r_{eff}(z = 2) = 39,57$ нм, для образца $L4$ – $r_{eff}(z = 2) = 37,74$ нм. Эти значения в среднем на 34% оказались меньше опытных значений гидравлического радиуса r_k (см. таблицу 2). При корректировке эффективного радиуса с учётом только коэффициента извилистости ξ , найденного по формуле (14), значение $r_{eff}(z = 2)/\xi^2$ оказалось больше радиуса r_i , вычисленного по формуле (8) при $\cos \theta = 1,0$, а при $\cos \theta = 0,5$ – меньше.

Расчёты, выполненные в работе [2] для природных камней, показывают, что для одного и того же образца радиус $r_{eff}(z = \infty)$ превышает радиус $r_{eff}(z = 2)$ до 1000 раз. В результате верхняя граница диапазона изменения этого радиуса значительно превышает значение радиуса r_v , а нижняя граница может приближаться к значению радиуса r_i . Поэтому точность прогнозирования коэффициента сорбции воды A и гидравлического радиуса r_k в первую очередь будет зависеть от того, насколько правильно будет задано значение числа z . Для конкретного материала без специального исследования задать правильно число z не просто. Отмечается [2], что при $z = 6$ найденное значение $r_{eff}(z = 6)$ достаточно точно предсказывает значение радиуса r_v , определенного с помощью ртутной порозиметрии. При $r_{eff}(z = 6)$ коэффициент сорбции воды \bar{A} , найденный по формуле (15), в среднем в 18,22 раза превышает опытные значения, а при $r_{eff}(z = \infty)$ в 35,93 раза. Даже при $r_{eff}(z = 2)$ это превышение составляет 1,61 раза. Последнее в какой-то мере можно объяснить тем, что при расчётах по формуле (15) принималось слишком низкое значение коэффициента $\xi = 1,73$ и угла смачивания $\theta = 0^\circ$. Следует уточнить эти значения.

Для природных камней, рассмотренных в работе [2], значение открытой пористости P изменялись от 0,064 до 0,298, а значения активной пористости Φ_a находились в пределах от 0,062 до 0,165. Если воспользоваться зависимостями для определения коэффициента извилистости ξ , предложенными в работах [7,20], то оказывается, что при упомянутых значениях P или Φ_a значения ко-

ээффициента ξ будут превышать 2,5. Как показано в работе [17], краевой угол смачивания θ значительно больше нуля из-за наличия сорбционной плёнки на смачиваемой поверхности материала. По данным работы [9], для песчаника угол θ можно принимать равным 55° . После уточнения значения ξ и θ коэффициент \tilde{A} , определённый по формуле (15) при $r_{eff}(z=2)$, в среднем окажется меньше опытных значений.

Следует также учитывать изменение вязкости воды перемещающихся в мелких капиллярах. Эти изменения можно оценить, воспользовавшись эмпирической формулой из работы [17],

$$\eta(r) = \eta_0(1 + 6,3 \cdot 10^{-7} \cdot r^{-0,79}), \quad (17)$$

где η_0 – вязкость объёмной воды, Па·с.

Расчёты по этой формуле показывают, что вязкость воды в капилляре радиуса $r = 3$ нм в 4,4 раза больше вязкости объёмной воды, при $r = 10$ нм в 2,3 раза, при $r = 1$ мкм в 1,03 раза и при $r > 1$ мкм влияние радиуса капилляра на вязкость воды отсутствует.

Экспериментами при постоянной температуре окружающего воздуха ($t = 26,5^\circ\text{C}$) показано [21], что при капиллярном впитывании воды образцами сухого газобетона (начальная температура образца и воды была равна $t_n = 26,5^\circ\text{C}$) перед фронтом жидкой влаги движется водяной пар, который сорбируется стенками пор, что приводит к выделению тепла и повышению температуры материала. В движущемся тепловом фронте температура повышалась примерно на 10°C . Очевидно, что с повышением температуры вязкость η и поверхностное натяжение σ воды уменьшаются, и этот эффект нужно учитывать при расчётах капиллярного впитывания воды.

Таким образом, при переходе от гидравлического радиуса идеальной модели r_i к гидравлическому радиусу капиллярно-пористого материала r_k' , трактуемому формулой (11), необходимо учитывать извилистость капилляров материала (коэффициент ξ), эффект «сужения-расширения» капилляров (коэффициент K_{SR}), эффект повышения температуры, связанный с сорбцией водяного пара (коэффициент K_T), эффект изменения вязкости воды в зависимости от гидравлического радиуса материала (коэффициент K_η) и фактический косинус угла смачивания ($\cos\theta < 1$).

Тогда соотношение для перехода от радиуса r_i к радиусу r_k' примет вид:

$$r_k' = \frac{r_i}{\cos\theta} \xi^2 \cdot \frac{K_\eta}{K_{SR} K_T}. \quad (18)$$

Остаётся количественно оценить величины, входящие в правую часть этого соотношения.

Гидравлический радиус идеальной модели r_i определяется по формуле (8) при $\cos\theta = 1$.

Коэффициент извилистости капилляров ξ можно найти по формуле, предложенной нами в работе [20]:

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

Для рассматриваемых стеновых материалов угол смачивания может достигать значения $\theta = 55^\circ$ ($\cos 55^\circ = 0,5736$). В таком случае можно принять $\cos \theta = 0,6$ ($\theta = 53^\circ 10'$).

При определении коэффициента K_T , учитывающего эффект повышения температуры в результате сорбционных процессов, принималось, что повышение температуры происходит от 20 до 30°C. При температуре 20°C для воды, по данным работы [9], имеем соотношение $\sigma_1/\eta_1 = 72,6$ м/с, а при температуре 30°C имеем $\sigma_2/\eta_2 = 90,24$ м/с. Тогда искомый коэффициент равен:

$$K_T = \frac{\sigma_2}{\eta_2} \cdot \frac{\eta_1}{\sigma_1} = \frac{90,24}{72,6} = 1,24. \quad (20)$$

Для определения коэффициента K_{SR} , учитывающего эффект сужения и расширения капилляра на его длине, использовались результаты компьютерной имитации (симуляции), представленные в работе [19]. В ней рассмотрено впитывание влаги вертикальными трещинами, значение просвета которых по высоте являлось случайной величиной характеризующейся одинаковым средним значением $b = 0,1$ мм и различными среднеквадратическими отклонениями σ ($\sigma = 0; 0,1b; 0,2b$; и $0,3b$). Отметим, что согласно формуле (10) или (11) просвет трещины равен гидравлическому радиусу.

В работе [19] для каждого значения σ по данным вычислительного эксперимента были построены кривые кинетики впитывания влаги. По этим кривым нами были определены коэффициенты сорбции воды: $A_0(\sigma = 0) = 12,65$; $A_1(\sigma = 0,1b) = 12,01$; $A_2(\sigma = 0,2b) = 10,40$ и $A_3(\sigma = 0,3b) = 7,59$ кг/(м² · с^{0,5}). Затем вычислены отношения A_i/A_0 ($i = 0,1,2,3$), после аппроксимации которых получили соотношение

$$A/A_0 = 1 - 4,5 \left(\frac{\sigma}{b} \right)^2. \quad (21)$$

Из формулы (15) видно, что коэффициент формы δ ка и коэффициент K_{SR} пропорциональны значению A^2 . В результате зависимость для определения коэффициента K_{SR} имеет вид

$$K_{SR} = \left[1 - 4,5 \left(\frac{\sigma}{b} \right)^2 \right]^{-2}. \quad (22)$$

Для дальнейших расчётов из диапазона $1,0 \geq \frac{A_i}{A_0} \geq 0,598$ ($i = 0,1,2,3$) было принято значение $A/A_0 = 0,8$. Тогда с учётом формул (21) и (22) получим

$$K_{SR} = 0,64. \quad (23)$$

В этом случае среднеквадратическое отклонение равно $\sigma = 0,21b$, а значение коэффициента $K_{SR} = 0,64$ немного превышает значение коэффициента формы для природных камней [2].

Коэффициент K_η , учитывающий изменение вязкости воды в зависимости от значения радиус капилляра, вычисляется с учётом формулы (17). Тогда получаем соотношение

$$K_{\eta} = \eta(r) / \eta_0 = 1 + 6,3 \cdot 10^{-7} (r_k^*)^{-0,79}, \quad (24)$$

где r_k^* определяется по формуле (18) при $K_{\eta} = 1$.

Таким образом, сейчас имеется возможность без дорогостоящей аппаратуры, сложных и трудоёмких экспериментов и вычислений довольно просто определить гидравлический радиус рассмотренных строительных материалов при капиллярном впитывании воды. Предлагаемый метод можно использовать и для других капиллярно-пористых материалов.

Для рассмотренных образцов керамического и силикатного материалов по предлагаемому методу были вычислены значения радиуса r_k' , учитывающего активную пористость. В таблице 3 приведены значения величин, входящих в правую часть формулы (18), и вычисленные для них значения гидравлического радиуса r_k' .

При сравнении значений радиуса r_k' со значениями гидравлического радиуса r_k , приведенными в таблице 2 и найденными с помощью ртутной порозиметрии, обнаруживается близость этих значений. Оказалось, что среднее значение радиусов r_k' на 7,2% превышает среднее значение радиусов r_k . Следует отметить, что разница между значениями радиусов r_k' и r_k безусловно должна быть, так как радиус r_k' характеризует пористую структуру материала в направлении и границах реального потока жидкости, а радиус r_k характеризует общую пористость материала в направлении наименьшего сопротивления вдавливанию ртути.

Таблица 3 – Значения величин, входящих в правую часть формулы (18) и вычисленные по ним значения гидравлического радиуса r_k' .

Образец	r_i , мм	$\cos \theta$	ξ	K_T	K_{SR}	K_{η}	r_k' , мм
L 1	2,98	0,6	2,38	1,24	0,64	1,49	52,83
L 2	4,58	0,6	2,36	1,24	0,64	1,34	71,82
L 3	6,38	0,6	2,37	1,24	0,64	1,26	94,85
L 4	3,32	0,6	2,44	1,24	0,64	1,43	59,37
L 5	3,02	0,6	2,45	1,24	0,64	1,46	55,60
ГК	1,66	0,6	2,36	1,24	0,64	1,77	34,37
СК	1,63	0,6	2,37	1,24	0,64	1,78	34,23

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования установлено, что с помощью существующих зависимостей, использующих данные ртутной порозиметрии, трудно получить достаточно точное описание кинетики капиллярного впитывания жидкости пористыми материалами. Получена зависимость для определения гидравлического радиуса идеальной модели (пористость материала представлена в виде пучка параллельных трубок одинакового радиуса), при котором кинетика одномерного капиллярного впитывания воды исследуемым материалом и его идеальной модели совпадают. Показано, что при описании кинетики впитывания жидкости сухим капиллярно-пористым материалом нужно учитывать не только особенности поровой структуры материала и его смачиваемость, но и изменение физических свойств жидкости, перемещающейся в этой пористой среде. На этой основе разработан метод определения гидравлического радиуса капиллярно-пористых стеновых строительных материалов, не требующий дорогостоящей аппаратуры, сложных и трудоёмких экспериментов и вычислительных процедур. При этом точность получаемого решения не уступает точности существующих методов.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Washburn, E.W. Dynamics of capillary flow/E.W.Washburn// *Phys. Review.* – 1921. Vol 17.
2. Benavente, D. Predicting the Capillary Imbibition of Porous Rocks from Microstructure / D. Benavente, P.Lock, M.Angeles Garcia del Cura, S.Ordenez//*Transport in Porous Media.* – 2002. – №49. – P. 59-76.
3. Cai, J.A Discussio of Effect of Tortuosity on the Capillary Imbibition in Porous Media/ J. Cai, B.Yu// *Transport in Porous Media.* – 2011. – №89. – P. 251-263.
4. Гурьев, В.В. Тепловая изоляция в промышленности. Теория и расчёт/ В.В.Гурьса, В.С.Жолудов, В.Г.Петров-Денисов – М.: Стройиздат, 2003. – 416 с.
5. Дульнев, Г.Н. Процессы переноса в неоднородных средах/ Г.Н.Дульнев, В.В.Новиков. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 247с.
6. Kubik, J. Przepływ wilgoci w materiałach budowlanych/ J.Kubik// *Politechnika Opolska.* – Opole, 2000.
7. Raimondo, M. Predicting the initial rate of water absorbtion in clay brich/ M.Raimondo, M.Dondi, D.Gardini, G.Guarini, F.Mazzanti// *Construction and Building Materials.* – 2009. – №23. – P.2623 – 2630.
8. Ciepłno – wilgotnościowe właściwości użytkowe budynków i materiałów budowlanych. Wielkości fizyczne dotyczące przenoszenia masy. Słownik: PN – ENISO9346:2009
9. Janz, M. Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels/ M. Janz – Lund: Division of Building Materials. – Report TVBM – 3076. – 1997. – 76p.
10. Nikitsin, V. Wpływ parametrow procesu wypalana na wzkniki podciągania kapilarnego wogę w tworzywach ceramicznych/ V. Nikitsin, B.Backiel-Brzozowska, M.Boltryk// *Ceramica/Ceramics.* – 2005. – Vol.91. – S.1223 – 1230.
11. Künzel, H.M. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One-and two-dimensional calculation using simple parameters/ H.M. Künzel// *Fraunhofer IRB Verlag.* – Stuttgart, 1995. – 65 s.
12. Nikitsin, V.I. Methods of determination of liquid transfer coefficient in building materials / V.I. Nikitsin, B.Backiel-Brzozowska// *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2012. – №55. – P. 4318 – 4322.
13. Cultrone, G. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks/ G. Cultrone, E.Sebastian, K.Elert, M.Jose de la Torre, O.Cazalla, C.Rodriques-Navarra// *Journal of European Ceramic Society.* – 2004. – №24. – P. 547 – 564.
14. Karaglou, M. Capillary rise kinetics of same building materials/ M. Karaglou, A.Moropoulou, A.Giakoumaki, M.K.Krokida// *Journal of colloid and interface science.* – 2005. – №284. – P. 260 – 264.
15. Kičaitė, A. Structure and destruction of processes of building ceramic products/ A. Kičaitė, R.Mačiulaitis, J.Malaiškėnė, G.Kudabiėnė – *Modern Building Materials. Structures and Techniques, Paper of the 9-th International Conference.* Maj 16-18, 2007. – Vilnius, Lithuania.
16. Roels, S. Modelling unsaturated moisture transport in heterogeneous limestone/ S. Roels. – *Katholiek Universiteit Toegaste Wetenschappen Arebergkaseel, B – 3001 Lenven (Belgium).* – 2000. – 21 lp.
17. Афонин, А.В. Вычисление поропроницаемости капиллярно-пористых материалов с учётом течения плёнок и конденсата/ А.В. Афонин, В.И. Никитин// *Вестник БрГТУ.* – 2003. – №1. Стр-во и архитектура. – С. 34 – 40.
18. Shen, L. Critical review of the impact of tortuosity on diffusion/L. Shen, Z.Chen// *Chemical Engineering Science.* – 2007. – №62. – P. 3748 – 3755.
19. Roels, S. Measuring and simulating moisture uptake in a fractured porous medium/ S. Roels, K.Vanderstec, J.Carmieliet// *Advances in Water Resources.* – 2003. – №26. – P. 237 – 246.
20. Nikitsin, V.I. Determination of capillary tortuosity coefficient in calculations of moisture transfer in building materials/ V.I. Nikitsin, B.Backiel-Brzozowska// *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2013. – №56. – P.30 – 34.
21. Низовцев, М.И. Распространение теплового фронта при капиллярной пропитке пористых материалов/ М.И. Низовцев, А.Н. Стерлягов, В.И. Терехов// *Ползуновский вестник.* – 2010. – №1 – С. 39 – 43.