

Афонин А.В., Никитин В.И., Шабанов Д.Н.

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВЛАГОПРОВОДНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Практика теплотехнических расчетов ограждающих конструкций зданий показывает [1], что с целью дальнейшего совершенствования этих и других расчетов необходимо использовать достаточно точные оценки параметров, характеризующих капиллярно-пористые строительные материалы в отношении переноса влаги. Одним из таких параметров является коэффициент влагопроводности (коэффициент диффузии жидкой влаги) материала, величина которого зависит от связи влаги с материалом, его пористой структуры, влагосодержания и температуры.

В настоящее время коэффициент влагопроводности строительных материалов обычно определяется экспериментальным путем по методике Р.Е. Брилинга [2], которая обладает рядом недостатков:

- высокая продолжительность эксперимента;
- необходимость поддержания постоянной температуры и влажности воздуха в помещении, где проводится эксперимент;
- необходимость распиливания призматического образца на несколько равных частей по длине;
- в процессе распиливания испаряется некоторое количество влаги, что ведет к снижению влагосодержания взвешиваемых частей образца и т. д.

Может быть, трудоемкость и несовершенство этого метода явились причиной того, что в специальной литературе приведено довольно ограниченное количество данных о коэффициенте влагопроводности строительных материалов.

Предлагаемая в данной работе методика лишена большинства вышеперечисленных недостатков и её экспериментальная часть состоит лишь в получении данных о кинетике одномерного водопоглощения.

Основной определяемой эмпирически числовой характеристикой структуры капиллярно-пористого материала является функция распределения объема пор по радиусам [3]. Методы её измерения требуют дорогостоящей аппаратуры и также не лишены недостатков. Поэтому целесообразно развить альтернативные методы оценки функции распределения объема пор по радиусам, один из которых рассмотрен в данной работе.

### 2. ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ВЛАГОПРОВОДНОСТИ

#### 2.1. Постановка задачи оценки влагопроводности

Для иллюстрации предлагаемой методики определения коэффициента влагопроводности были использованы опытные данные о кинетике одномерного водопоглощения, полученные на образце в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами 4x4x11 см из автоклавированного материала, в котором вместо кварцевого песка использовалась отработанная формовочная смесь, содержащая около 88% кремнезема.

*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, Политехника Белостоцка (ZWB), Польша.*

*Шабанов Дмитрий Николаевич. Ассистент Полоцкого государственного университета.*

Образец имел плотность  $\rho_0 = 1690 \text{ кг/м}^3$ ; его боковые стороны были покрыты водонепроницаемой замазкой (парафином). Вертикально подвешенный образец нижней гранью соприкасался с поверхностью воды и помощью весов отслеживалось изменение его массы во времени  $m(t)$ .

При математическом описании одномерного движения влаги в капиллярно-пористом материале пренебрегали испарением влаги и действием силы тяжести на процесс перемещения влаги в образце.

Нестационарное одномерное перемещение влаги описывается уравнением диффузии вида [2, 3]:

$$\rho_0 \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta(\omega) \frac{\partial \omega}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – объемная масса материала;

$\omega(x, t)$  – весовая влажность, зависящая от координаты  $x$  и времени  $t$ ;

$\beta(\omega)$  – коэффициент влагопроводности материала.

Начальное условие предполагает, что образец в начальный момент времени (при  $t = 0$ ) был сухим:

$$\omega(x, 0) = 0, \quad 0 < x \leq L, \quad (2)$$

где  $L$  – длина образца.

Граничные условия означают, что на погруженной в воду нижней грани образца влажность максимальна, а через находящуюся в воздухе верхнюю грань влага не протекает:

$$\omega(0, t) = \omega_{max}, \quad t \geq 0, \quad (3)$$

где  $\omega_{max}$  – максимальная весовая влажность материала,

$$\beta(\omega) \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0, \quad x = L, \quad t \geq 0. \quad (4)$$

Предполагается известным изменение массы образца со временем:

$$m(t) = m_0 + \rho_0 S \int_0^L \omega(x, t) dx, \quad (5)$$

где  $m_0$  – начальная масса образца при  $t = 0$ ;

$S$  – площадь поперечного сечения образца.

Постановка задачи состоит в определении неизвестной функции  $\beta(\omega)$  исходя из соотношений (1)-(5). Эта задача является нестандартной с математической точки зрения и в настоящее время, по-видимому, не существует эффективного численного алгоритма для ее решения.

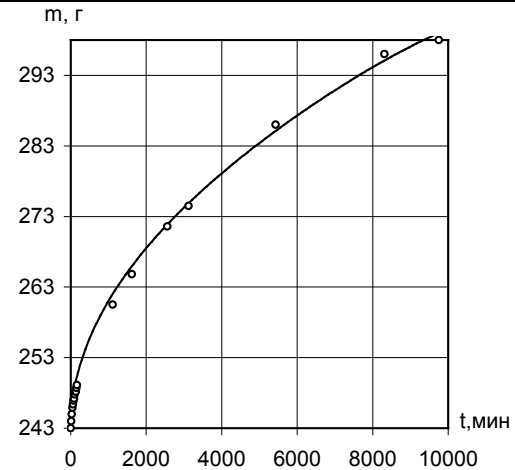
**2.2. Результаты численного анализа**

Для оценки коэффициента влагопроводности была составлена компьютерная программа, в которой значения  $\beta(\omega)$  задавались набором из нескольких точек и затем интерполировались кубическими сплайнами [4]. Программа решала квазилинейное дифференциальное уравнение диффузии (1) с начальными и граничными условиями (2)-(4) по чисто неявной схеме. Значения коэффициента влагопроводности зависели от значений влажности на новом слое. В соответствии с [5] полученное нелинейное уравнение сводилось с помощью итерационного метода Ньютона к линейному уравнению с трехдиагональной матрицей, которое решалось методом прогонки [6]. Интерполяция сплайнами позволяла при этом дифференцировать значения коэффициента влагопроводности по влажности аналитически. Полученное решение  $\omega(x,t)$  интегрировалось согласно (5).

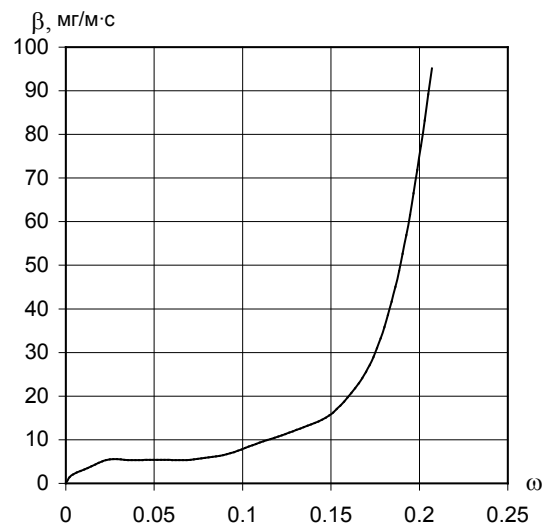
Таким образом, появилась возможность, изменяя значения  $\beta(\omega)$  и решая для них задачу (1)-(5), наблюдать, как изменяются значения  $m(t)$  и сравнивать их с экспериментальными данными. Путем численного экспериментирования удалось довольно быстро добиться удовлетворительного совпадения вычисленных значений  $m(t)$  с полученными опытными данными. На рис. 1, 2 и в таблице 1 изображены результаты проведенного эксперимента и вычислений. Характер кривой на рис. 2 не противоречит сложившимся представлениям о зависимости коэффициента влагопроводности материала от его влагосодержания. На рис. 3 изображена полученная в результате расчетов зависимость  $\omega(x,t)$ , которая вполне правдоподобно отражает кинетику водонасыщения гидрофильного капиллярно-пористого материала.

**Таблица 1.** Изменение массы образца со временем. Сравнение опытных данных  $m^e$  с расчетными  $m^t$

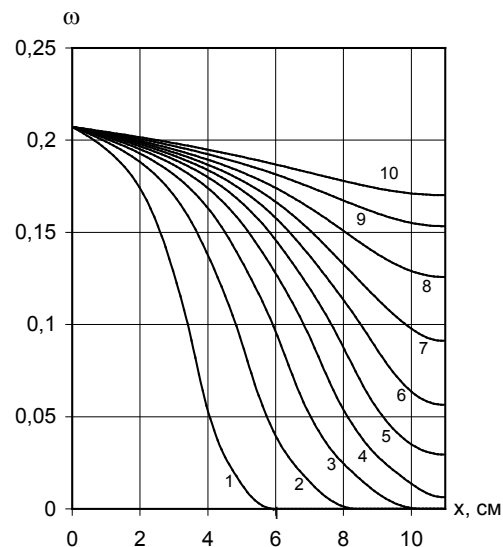
№	t, мин	$m^e$ , г	$m^t$ , г
1	0	243	243,21
2	15	244	245,09
3	30	245	246,02
4	45	245,9	246,73
5	60	246,4	247,34
6	75	246,9	247,86
7	90	247,2	248,34
8	105	247,8	248,78
9	120	248,2	249,19
10	135	248,2	249,57
11	150	248,7	249,93
12	165	249,1	250,27
13	1110	260,5	260,00
14	1620	264,8	265,96
15	2559	271,6	271,87
16	3120	274,5	274,88
17	5430	286	285,13
18	8310	296	295,09
19	9750	298	298,98



**Рис. 1.** Изменение массы образца со временем. Сравнение опытных данных с расчетными. Кружочками обозначены опытные данные.



**Рис. 2.** Коэффициент влагопроводности автоклавированного материала с плотностью 1690 кг/м<sup>3</sup> в зависимости от его весовой влажности, полученный в результате численного анализа.



**Рис. 3.** Изменение влажности по длине образца автоклавированного материала в зависимости от времени. 1 – t=1000 мин, 2 – t=2000 мин, 3 – t=3000 мин, 4 – t=4000 мин, 5 – t=5000 мин, 6 – t=6000 мин, 7 – t=7000 мин, 8 – t=8000 мин, 9 – t=9000 мин, 10 – t=9750 мин.

### 3. ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОР ПО РАДИУСАМ

#### 3.1. Математическое описание задачи

В работах [7, 8] была установлена зависимость коэффициента влагопроводности от функции распределения объема пор по радиусам, основанная на законе фильтрации Дарси и уравнении Козени для коэффициента проницаемости. При пренебрежении сорбционным увлажнением эта зависимость имеет вид:

$$\beta(\omega) = \frac{\rho_0 \sigma \cos \varphi \omega^3}{\rho_{ж} \nu \xi(\omega_V) S_V^2(r_\omega) f_V(r_\omega) r_\omega^2}, \quad (6)$$

где  $\rho_0$  – объемная масса материала;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;  $\nu$  – вязкость жидкости;  $\varphi$  – краевой угол смачивания материала жидкостью;  $\omega_V$  – объемная влажность материала;  $\xi$  – коэффициент извилистости;  $S_V$  – удельная поверхность соприкосновения жидкости с веществом материала;  $f_V$  – дифференциальная функция распределения объема пор по радиусам;  $r_\omega$  – критический радиус (радиус капилляров, содержащих мениски).

Величины  $\omega_V$ ,  $r_\omega$ ,  $S_V$ ,  $\xi$  определяются из соотношений:

$$\omega_V = \frac{\rho_0}{\rho_{ж}} \omega, \quad (7)$$

$$\omega_V = \int_0^{r_\omega} f_V(r) dr, \quad (8)$$

$$S_V(r_\omega) = 2 \int_0^{r_\omega} \frac{f_V(r)}{r} dr, \quad (9)$$

$$\xi(\omega_V) = \omega_V \left\{ \frac{1}{2} + \sin \left[ \frac{\arcsin(2\omega_V - 1)}{3} \right] \right\}^{-2}. \quad (10)$$

#### 3.2. Результаты вычислений

Соотношения (6)-(10) обладают одной существенной особенностью. А именно, значение коэффициента влагопроводности при данной влажности  $\omega$  зависит только от значений функции  $f_V$  в диапазоне от 0 до  $r_\omega$ . Справедливо и обратное: значение функции распределения объема пор по радиусам при данном радиусе  $r_\omega$  зависит только от значений коэффициента влагопроводности в диапазоне влажностей от 0 до  $\omega$ .

Благодаря указанной особенности появилась возможность реализации эффективного алгоритма восстановления функции распределения объема пор по радиусам по известным значениям коэффициента влагопроводности материала. Изменяя радиус пор материала  $r_{\omega i}$  начиная с 0 с некоторым постоянным шагом, на каждом шаге вычисляли значение функции  $f_{Vi}$ , решая с помощью метода Ньютона уравнение  $\beta'(f_{Vi}) - \beta^e(\omega_i(f_{Vi})) = 0$ , где  $\beta^e$  является результатом решения задачи (1)-(5), а  $\beta'$  удовлетворяет соотношениям (6)-(10). Дифференцирование функций  $\beta^e$  и  $\beta'$  выполнялось аналитически.

Полученная функция распределения объема пор по радиусам для рассмотренного автоклавированного материала плотностью  $1690 \text{ кг/м}^3$  изображена на рис. 4. При расчетах принято  $\cos \varphi = 0,3$ . Из рис. 4 следует, что примерно 80% открытой пористости материала имеет поры размера от 0,01 до 0,03 мкм. Такие показатели характерны для однородного мелкопористого материала.

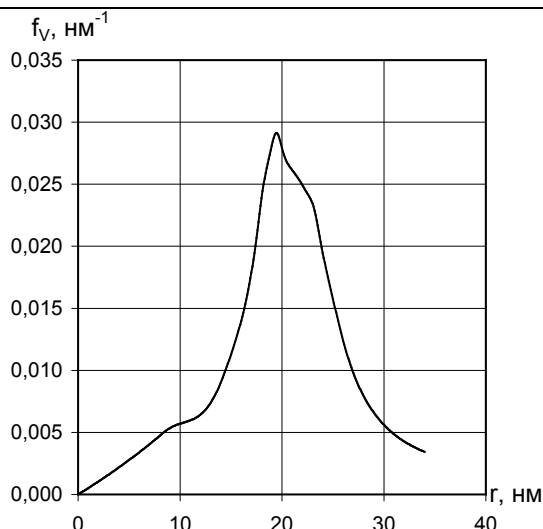


Рис. 4. Полученная в результате численного анализа функция распределения объема пор по радиусам для образца из автоклавированного материала.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика оценки коэффициента влагопроводности и распределения объема пор по радиусам, необходимых при выполнении теплотехнических и других расчетов обладает следующими преимуществами:

- для проведения эксперимента не требуется специальная аппаратура, кроме весов;
  - при использовании одного образца имеется возможность получить гораздо большее количество опытных точек, чем при его распиливании;
  - методика является неразрушающей, что позволяет испытывать один и тот же образец несколько раз, например, до и после многократного воздействия влаги и/или отрицательных температур, и отслеживать влияние этих факторов на структуру материала, а также на характер изменения коэффициента влагопроводности.
- К недостаткам методики следует отнести:
- высокую математическую сложность модели;
  - обязательное наличие вычислительной техники для обработки опытных данных.

Работа выполнена в рамках сотрудничества между Брестским государственным техническим университетом и Политехникой Белостоцкой (Польша).

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Nikitin V., Lapko A., Kowalczyk R. Numerical modeling of heat transfer and moisture migration in multi-layer wall structures. – Structural Engineering World Congress, SEW2002, Yokohama, Japan, October 9-12, 2002, T1-3-c-4.
2. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
3. Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики. – Мн.: Изд-во Акад. Наук БССР, 1961. – 520 с.
4. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит. изд-ва "Наука", – 1977. – 456 с.
5. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит. изд-ва "Наука", – 1978. – 512 с.
6. Самарский А.А. Введение в численные методы. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., – 1987. – 288 с.
7. 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.
8. 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.