

ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВЛАЖНЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СТЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. И. Никитин¹, С. К. Никитин²

¹Д. т. н., профессор, профессор кафедры теоретической механики
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: nik_ol40@mail.ru
²Студент факультета электронно-информационных систем
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, e-mail: sniki@protonmail.com

Реферат

С помощью теории обобщенной проводимости и геометрического моделирования структуры влажных капиллярно-пористых материалов получены зависимости для расчета их эффективной теплопроводности. В зависимости от значений влагосодержания пор установлены границы применения полученных формул. На примерах для глиняного кирпича продемонстрированы особенности расчета влажных капиллярно-пористых материалов. Установлено, что результаты расчетов достаточно точно предсказывают опытные данные.

Ключевые слова: эффективная теплопроводность, газосиликатные материалы, бимодальное распределение размеров пор, моделирование структуры влажного материала, теория обобщенной проводимости.

DEPENDENCIES FOR CALCULATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF WET CAPILLARY-POROUS WALL MATERIALS

V. I. Nikitin, S. K. Nikitin

Abstract

Using the theory of generalized conductivity and geometric modeling of the structure of wet capillary-porous materials, dependencies were obtained for calculating their effective thermal conductivity. Depending on the values of the moisture content of the pores, the limits of application of the obtained formulas are established. On examples for clay bricks, the features of the calculation of wet capillary-porous materials are demonstrated. It has been established that the results of calculations quite accurately predict the experimental data.

Keywords: Effective thermal conductivity, gas silicate materials, bimodal pore size distribution, wet material structure modeling, theory of generalized conductivity.

Введение

Результаты многочисленных натурных исследований, например [1–4], показывают, что влагосодержание Ψ капиллярно-пористых материалов наружных ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий часто в разы превышает значения, принимаемые при проектировании этих конструкций. Повышенное влагосодержание материалов ограждающих конструкций приводит к снижению показателей их технического состояния. Прежде всего снижается теплоизолирующая способность ограждений, для прогнозирования которой нужно знать значения теплопроводности используемых материалов в зависимости от их влагосодержания, а также характера распределения влаги по объёму, меняющегося с изменением угла смачивания. Теплопроводность одного и того же материала с одинаковым влагосодержанием может в зависимости от распределения влаги в материале отличаться в несколько раз [5]. По этой и другим причинам, упомянутым в работах [5–7], экспериментальная оценка теплопроводности влажных капиллярно-пористых материалов не всегда даёт удовлетворительные результаты. Поэтому необходимо развивать инженерные методы расчёта теплопроводности материалов, основанные на математическом моделировании совместных процессов тепло- и влагопереноса.

Для этого, как и ранее [7], влажные капиллярно-пористые материалы будем рассматривать как неоднородные трёхкомпонентные системы, состоящие из твёрдого скелета 1, газа (паровоздушная смесь) 2 и жидкости 3. При построении зависимостей для определения эффективной теплопроводности таких систем использовались методы обобщенной проводимости в сочетании с геометрическим моделированием структуры [5].

Жидкость и газ в поровом пространстве твёрдого скелета модели представлялись как бинарная система, структура которой зависит от влагосодержания, определяемого из отношения влагосодержания Ψ к пористости P материала $\Psi_p = \Psi P$. Для выяснения вида структуры

бинарной системы нужно определить соотношение между фактическим Ψ_p и некоторыми граничными значениями Ψ_p' и Ψ_p'' ($\Psi_p < \Psi_p'$), при которых происходит переход от одной структуры к другой. Грубая оценка граничных значений Ψ_p' и Ψ_p'' может быть выполнена по графикам, приведенным в [5] и построенным только для одного значения пористости материала $P \approx 0,72$. Более точная оценка этих значений рассмотрена нами в [7,8]. Если установлено соотношение $\Psi_p' \leq \Psi_p$, то включения жидкости являются изолированными. При $\Psi_p' \leq \Psi_p \leq \Psi_p''$ жидкость становится непрерывной компонентой бинарной системы. И наконец, при $\Psi_p = \Psi_p''$ непрерывное распределение паровоздушной смеси сменится на распределение в виде изолированных включений в центре ячеек.

Расчёт эффективной теплопроводности материала во всём диапазоне изменения влагосодержания может быть выполнен методом последовательного приведения трёхкомпонентной системы к бинарной [5]. Согласно этому методу вначале рассматривается бинарная система, состоящая из газа и жидкости (поровое пространство), а затем следующая бинарная система из твёрдого скелета и порового пространства. При этом конечный результат расчёта будет зависеть от последовательности рассматриваемых компонентов. Другой недостаток заключается в том, что теплопроводность бинарной системы из паровоздушной смеси и жидкости предлагается определить по формулам, полученным при условии, что угол смачивания $\theta = 0^\circ$. Известно [8, 9], что идеальное смачивание не характерно для пористых строительных материалов и $\theta > 0^\circ$.

Упомянутые недостатки приводят к существенным погрешностям при расчётах [7], для устранения которых следует использовать более обоснованный подход, одновременно учитывающий теплопроводности и объёмные концентрации всех трёх компонент при углах смачивания θ от 0° до 90° . С помощью данного подхода были

получены зависимости для определения эффективной теплопроводности материала для структур с изолированными и непрерывными включениями жидкости [7]. Однако при влагосодержании пор Ψ_p и Ψ_p'' не обеспечивался плавный переход от одной структуры к другой, что приводило к погрешностям в расчётах. В данной работе построены дополнительные зависимости, позволяющие выполнить расчёт эффективной теплопроводности капиллярно-пористых материалов во всём возможном диапазоне изменения влагосодержания пор и устранить недостатки работы [7]. Рассмотрены особенности расчёта теплопроводности влажных капиллярно-пористых материалов, которые продемонстрированы на примерах с использованием опытных данных для образцов стеновой керамики.

Зависимости для определения эффективной теплопроводности влажных пористых материалов с замкнутыми газовыми включениями

В случае замкнутых газовых включений модель реальной структуры влажного пористого материала для восьмой части элементарной ячейки имеет вид, приведенный на рисунок 1, а и построенной с учетом допущений теории обобщенной проводимости [5]. Через рассматриваемую элементарную ячейку параллельно её боковым граням проходит общий тепловой поток G , состоящий из взаимосвязанных потоков $G_1 \dots G_4$, протекающих через её отдельные участки, суммарная площадь которых $S = L^2$.

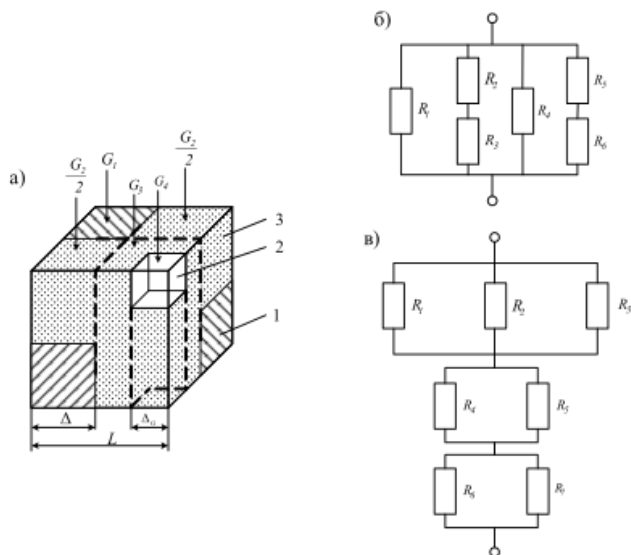


Рисунок 1 – Восьмая часть элементарной ячейки с изолированным включением газа и составляющими общего теплового потока $G_1 \dots G_4$ (а); схема соединения сопротивлений отдельных участков при адиабатическом (б) и изотермическом (в) делении элементарной ячейки 1, 2, 3 – твердая, газовая и жидкая компоненты соответственно

Рассмотрим вывод зависимости для определения эффективной теплопроводности λ_a данной элементарной ячейки при её делении бесконечно тонкими адиабатическими плоскостями параллельными потоку тепла G и непроницаемыми для линий тока. В результате объём элементарной ячейки оказался разбитым на 8 однородных частей (элементов). Термическое сопротивление i -го элемента вычисляется по формуле

$$R_i = \frac{l_i}{\lambda_i S_i}, \tag{1}$$

где l_i – длина линий тока (высота) i -й части, м;
 λ_i – коэффициент теплопроводности i -й части, Вт/(м·К);
 S_i – площадь поперечного сечения i -й части, м².

Тепловой поток G_1 проходит элемент твердого скелета, имеющий длину $l_1 = L$, поперечное $S_1 = \Delta^2$ и теплопроводность λ_1 . Согласно формуле (1) имеем сопротивление

$$R_1 = \frac{L}{\lambda_1 \Delta^2}. \tag{2}$$

Тепловой поток G_2 с поперечным сечением $S_2 = 2\Delta(L - \Delta)$ проходит через жидкую и твердую компоненты с сопротивлениями

$$R_2 = \frac{L - \Delta}{\lambda_3 2\Delta(L - \Delta)}, R_3 = \frac{\Delta}{\lambda_1 2\Delta(L - \Delta)}. \tag{3}$$

Тепловой поток G_3 с поперечным сечением $S_3 = (L - \Delta)^2 - \Delta_f^2$ проходит только через жидкую компоненту с сопротивлением

$$R_4 = \frac{L}{\lambda_3 [(L - \Delta)^2 - \Delta_f^2]}. \tag{4}$$

И наконец, тепловой поток G_4 с поперечным сечением $S_4 = \Delta_f^2$ проходит газовую и жидкую компоненты с сопротивлениями

$$R_5 = \frac{\Delta_f}{\lambda_2 \Delta_f^2}, R_6 = \frac{L - \Delta_f}{\lambda_3 \Delta_f^2}. \tag{5}$$

Схема соединения сопротивлений элементарной ячейки приведена на рисунке 1б. В этом случае общее термическое сопротивление элементарной ячейки R определяется следующим образом:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5 + R_6}. \tag{6}$$

Общее термическое сопротивление того же объема $V = L^3$, заполненного однородным веществом с теплопроводностью λ_a , находим по формуле

$$R = \frac{L}{\lambda_a L^2} = \frac{1}{\lambda_a L}. \tag{7}$$

Переписав формулу (6) с учетом (7) и (2) – (5) после несложных преобразований, получим зависимость для определения эффективной теплопроводности трехкомпонентной системы, газовая компонента которой является замкнутой, при адиабатическом делении элементарной ячейки

$$\frac{\lambda_a}{\lambda_1} = c^2 + \frac{2v_2 c(1-c)}{1-c+v_2 c} + v_2 [(1-c)^2 - c_f^2] + \frac{v_1 v_2 c_f^2}{v_2 c_f + v_1(1-c_f)}, \tag{8}$$

где $c = \Delta/L, c_f = \Delta_f/L, v_1 = \lambda_2/\lambda_1, v_2 = \lambda_3/\lambda_1$.

Далее покажем вывод зависимости для определения эффективной теплопроводности той же трёхкомпонентной системы при изотермическом делении элементарной ячейки. Элементарную ячейку, приведенную на рисунке 1а, поделим двумя плоскостями перпендикулярными общему тепловому потоку, на три слоя различной толщины. Толщина первого (верхнего) слоя равна $h_1 = \Delta_f$, второго (среднего) слоя $h_2 = L - \Delta - \Delta_f$, третьего (нижнего) слоя $h_3 = \Delta$. В каждом слое компоненты разделены адиабатическими плоскостями, параллельными общему потоку тепла. В результате первый слой состоит из трех элементов, второй и третий слои из двух элементов, термическое сопротивление которых можно определить по формуле (1).

Для первого слоя получим следующие сопротивления:

$$R_1 = \frac{\Delta_r}{\lambda_1 \Delta^2}, R_2 = \frac{\Delta_r}{\lambda_2 \Delta_r^2}, R_3 = \frac{\Delta_r}{\lambda_3 (L^2 - \Delta^2 - \Delta_r^2)}. \quad (9)$$

Для второго слоя имеем следующие два сопротивления:

$$R_4 = \frac{L - \Delta - \Delta^2}{\lambda_1 \Delta^2}, R_5 = \frac{L - \Delta - \Delta^2}{\lambda_3 (L^2 - \Delta^2)}. \quad (10)$$

Два сопротивления имеем и для третьего слоя:

$$R_6 = \frac{\Delta}{\lambda_1 [L^2 - (L - \Delta)^2]}, R_7 = \frac{\Delta}{\lambda_3 (L - \Delta)^2}. \quad (11)$$

Схема соединения термических сопротивлений трёх слоёв элементарной ячейки показана на рисунке 1с. Для такой схемы общее термическое сопротивление элементарной ячейки R можно записать следующим образом:

$$\frac{1}{R} = \left[\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)^{-1} + \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right)^{-1} + \left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} \right)^{-1} \right]^{-1}. \quad (12)$$

После подстановки сопротивлений, определяемых по формулам (9) – (11), в соотношение (12) и учета формулы (7) получим зависимость для определения эффективной теплопроводности λ_u трехкомпонентной системы при изотермическом делении элементарной ячейки, показанной на рисунке 1а.

$$\frac{\lambda_u}{\lambda_1} = \left[\frac{c_r}{c^2 + v_1 c^2 + v_2 (1 - c^2 - c^2)} + \frac{1 - c - c_r}{c^2 + v_2 (1 - c^2)} + \frac{c}{c(2 - c) + v_2 (1 - c)^2} \right]^{-1}, \quad (13)$$

где, как и в формуле (8), $c = \Delta/L, c_r = \Delta_r/L, v_1 = \lambda_2/\lambda_1, v_2 = \lambda_3/\lambda_1$.

При известной объёмной концентрации твердого скелета m_1 значение c можно определить по формуле [10]

$$c = 0,5 + \sin \left[\frac{\arcsin(2m_1 - 1)}{3} \right]. \quad (14)$$

С другой стороны, если известно значение c , то можно определить m_1 [10]

$$3c^2 - 2c^3 = m_1, \quad (15)$$

а также пористость материала

$$P = 1 - m_1 = 1 - 3c^2 + 2c^3. \quad (16)$$

Что же касается значения c_r , то здесь необходимо показать схему его расчета. При известном значении c и угле смачивания θ , определяем граничное значение влагосодержания пор ψ''_P , используя результаты работы [7]. Если угол смачивания неизвестен, то на основе данных для кварцевого песка, песчаника [9] и полимера [8] можно принимать равным 45° . Например, используя формулу (6) работы [7], при $\theta = 45^\circ$ и $c = 0,5$ получим $\psi''_P = (5 + 13c) / [6(1 + 2c)] = 0,9583$. Тогда объёмная концентрация замкнутых включений газа в порах равна $1 - \psi''_P = 0,0417$ и соответственно в материале

$m_{2r} = (1 - \psi''_P)P = 0,02135$. По определению

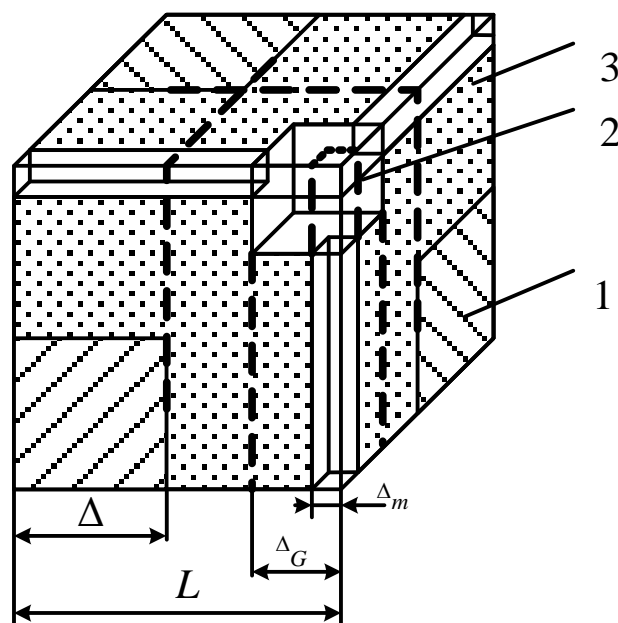
$c_r = \sqrt[3]{m_{2r}} = 0,2774$. С уменьшением угла смачивания θ значение c_r увеличивается. Так при $\theta = 0^\circ$ и $c = 0,5$ имеем $c_r = 0,4029$. Отметим, что при $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ и $0 < c < 1$ имеет место неравенство $c_r < 1 - c$.

Расчёты по формулам (8) и (13) дают нижнюю λ_a и верхнюю λ_u оценки эффективной теплопроводности влажного пористого материала, а её истинное значение целесообразно определять как среднее арифметическое $\lambda = 0,5(\lambda_a + \lambda_u)$.

Далее рассмотрим вывод формулы для случая одновременной непрерывности газовой и жидкой компонент с взаимосвязанными структурами, который характеризуется влагосодержанием пор ψ_P между двумя граничными значениями $\psi'_P \leq \psi_P \leq \psi''_P$. При этом возможны два независимых подхода. При первом подходе в качестве основной задаётся структура газовой компоненты, а при втором – структура жидкой компоненты.

Теплопроводность трехкомпонентной системы с заданной структурой газовой компоненты

Данный случай в виде восьмой части элементарной ячейки представлен на рисунке 2. При выводе зависимостей принято, что размер $\Delta_r = c_r L$, найденный для замкнутого газового включения в центре ячейки, с увеличением объёмной концентрации газа $m_2 > m_{2r}$ не меняется ($c_r = \text{const}$). Тогда прирост m_2 приводит к увеличению только размера Δ_m поровых каналов, соединяющих поры размера Δ_r в центре ячеек. При этом должно выполняться условие $\Delta_m \leq \Delta_r$.



1, 2, 3 – твердая, газовая и жидкая компоненты

Рисунок 2 – Восьмая часть элементарной ячейки с заданной структурой непрерывной газовой компоненты

После деления элементарной ячейки, показанной на рисунке 2, адиабатическими плоскостями и реализации процедуры, использованной при вводе формулы (8), была получена зависимость для определения эффективной теплопроводности λ_a (нижняя оценка) трехкомпонентной системы с непрерывными включениями газовой компоненты заданной структуры

$$\frac{\lambda_a}{\lambda_1} = c^2 + \frac{2v_2c(1-c-c_m)}{1-c+v_2c} + v_2 \left[(1-c-c_m)^2 - (c_r-c_m)^2 \right] + \frac{2v_1v_2cc_m}{v_2c_m+v_1(1-c-c_m)+v_1v_2c} + \frac{2v_1v_2c_m(1-c-c_r)}{v_1(1-c_m)+v_2c_m} + \frac{v_1v_2(c_r^2-c_m^2)}{v_1(1-c_r)+v_2c_r} + v_1c_m^2, \quad (17)$$

где $v_1 = \lambda_2/\lambda_1, v_2 = \lambda_3/\lambda_1, c = \Delta/L, c_r = \Delta_r/L, c_m = \Delta_m/L$.

После деления той же элементарной ячейки изотермическими плоскостями на четыре слоя и определения тепловых сопротивлений каждого слоя, а также преобразований, как при выводе формулы (13),

получим зависимость для определения эффективной теплопроводности λ_u (верхняя оценка) рассматриваемой трехкомпонентной системы

$$\frac{\lambda_u}{\lambda_1} = \left[\frac{c_m}{c^2 + v_1[c_r^2 + 2c_m(1-c_r)] + v_2[1-c^2 - c_r^2 - 2c_m(1-c_r)]} + \frac{c_r - c_m}{c^2 + v_1c_r^2 + v_2(1-c^2 - c_r^2)} + \frac{1-c-c_r}{c^2 + v_1c_m^2 + v_2(1-c^2 - c_m^2)} + \frac{c}{c(2-c) + v_1c_m^2 + v_2[1-c(2-c) - c_m^2]} \right]^{-1}, \quad (18)$$

где, как и в формуле (17), $v_1 = \lambda_2/\lambda_1, v_2 = \lambda_3/\lambda_1, c = \Delta/L, c_r = \Delta_r/L, c_m = \Delta_m/L$.

Определим значение c_m при известной объемной концентрации газа $m_2 \geq c_r^3$. Из рисунка 2 следует, что объем поровых каналов равен $V_m = 3\Delta_m^2(L - \Delta_r)$. С другой стороны этот же объем равен $V_2 - \Delta_r^3$, где V_2 – общий объем газа в ячейке. После деления этих объемов на объем ячейки $V = L^3$ приходим к уравнению

$$3c_m^2(1-c_r) = m_2 - c_r^3, \quad (19)$$

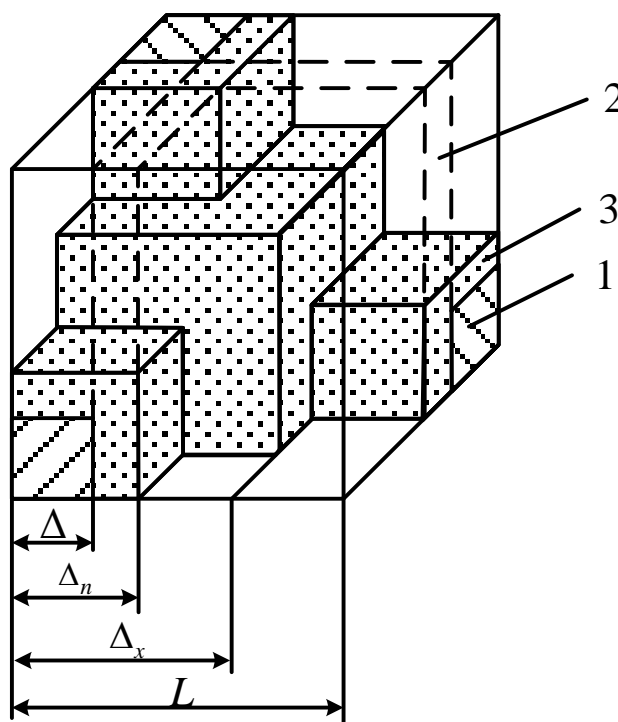
решая которое, находим значение c_m .

Согласно формуле (19) при $m_2 = c_r^3$ имеем $c_m = 0$. Это свидетельствует об исчезновении поровых каналов, соединяющих поры в центре ячеек, и формулы (17) и (18) приобретают вид, который

имеют формулы (8) и (13). В таком случае формулы (17) и (18) обеспечивают переход от структуры с непрерывными включениями газа (рисунок 2) к структуре с изолированными включениями газа (рисунок 1).

Теплопроводность трехкомпонентной системы с заданной структурой жидкой компоненты

В данном случае элементарная ячейка имеет вид, представленный на рисунке 3. Для рассмотренной элементарной ячейки описанным выше способом были получены зависимости для определения нижней λ_a и верхней λ_u оценок эффективной теплопроводности влажных пористых материалов.



1,2,3 – твердая, газовая и жидкая компоненты

Рисунок 3 – Восьмая часть элементарной ячейки с заданной структурой непрерывной жидкой компоненты

При делении элементарной ячейки (рисунок 3) адиабатическими плоскостями пришли к зависимости

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_a}{\lambda_1} = & c^2 + v_2(c_n - c)^2 + \frac{2v_2c(c_n - c)}{1 - c + v_2c} + \\ & + \frac{2v_1v_2c(c_x - c_n)}{v_2(1 - c_x) + v_1(c_x - c) + v_1v_2c} + \frac{2v_1v_2(c_x - c_n)(c_n - c)}{v_2(1 - c_x) + v_1c_x} + \\ & + \frac{v_1v_2(c_x - c_n)^2}{v_2(1 - c_x) + v_1c_x} + \frac{2v_1v_2c(1 - c_x)}{v_2(1 - c_n) + v_1(c_n - c) + v_1v_2c} + \\ & + \frac{2v_1v_2(c_n - c)(1 - c_x)}{v_2(1 - c_n) + v_1c_n} + v_1[(1 - c_n)^2 - (c_x - c_n)^2], \end{aligned} \quad (20)$$

где $v_1 = \lambda_2/\lambda_1, v_2 = \lambda_3/\lambda_1, c = \Delta/L, c_n = \Delta_n/L, c_x = \Delta_x/L$.

Зависимость, полученная при делении той же элементарной ячейки изотермическими плоскостями, имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_u}{\lambda_1} = & \left[\frac{1 - c_x}{c^2 + v_2(c_n^2 - c^2) + v_1(1 - c_n^2)} + \frac{c_x - c_n}{c^2 + v_2(c_x^2 - c^2) + v_1(1 - c_x^2)} + \right. \\ & + \frac{c_n - c}{c^2 + v_2[2c_n(1 - c_x) + (c_x^2 - c^2)] + v_1[(1 - c_n)^2 - (c_x - c_n)^2]} + \\ & \left. + \frac{c}{c(2 - c) + v_2[2(c_n - c)(1 - c) - (c_n - c)^2 + (c_x - c_n)^2] + v_1[(1 - c_n)^2 - (c_x - c_n)^2]} \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (21)$$

где, как и в формуле (20), $v_1 = \lambda_2/\lambda_1, v_2 = \lambda_3/\lambda_1, c = \Delta/L, c_n = \Delta_n/L, c_x = \Delta_x/L$.

Значение c_x связано с объёмом жидкости в узле решётки твердого скелета элементарной ячейки $V_y = \psi_y L^3$. Влагосодержание материала в узле решётки ψ_y определяется из условия, что влагосодержание пор равно нижнему граничному значению ψ'_p . Тогда получим $\psi_y = \psi'_p P$. Из рисунка 3 видно, что объём жидкости в узле решетки равен $(\Delta_x - \Delta)^3 + 3\Delta(\Delta_x - \Delta)^2 = \psi_y L^3$. Разделив левую и правую части этого выражения на объём элементарной ячейки $V = L^3$ и обозначив $c_x - c = d$, получим кубическое уравнение

$$d^3 + 3cd^2 = \psi_y, \quad (22)$$

решая которое определим физически оправданный корень $d = c_x - c$ (при известном значении $c = \Delta/L$) и, следовательно, значение c_x .

В соответствии с теорией протекания [5] принимаем, что с повышением общего влагосодержания материала $\psi > \psi_y$ влагосодержание в узле решетки ψ_y не меняется ($c_x = const$).

При известной разнице $(\psi - \psi_y)$ можно определить значение $c_n = \Delta_n/L$. Как видно из рисунка 3, объём жидкости $(\psi - \psi_y)L^3$, распределённой на длине $(L - \Delta_x)$ трёх стержней элементарной ячейки, равен $[(\Delta_n - \Delta) \cdot \Delta \cdot 2 + (\Delta_n - \Delta)] \cdot 3(L - \Delta_x) = 3(L - \Delta_x)(\Delta_n^2 - \Delta^2)$.

После деления этого равенства на объём ячейки $V = L^3$ приходим к квадратному уравнению с неизвестной c_n

$$3(1 - c_x)(c_n^2 - c^2) = \psi - \psi_y, \quad (23)$$

положительный корень которого даёт искомое значение c_n .

Если при расчёте по формуле (23) окажется, что $c_n > c_x$, то в этом случае при определении теплопроводности материала нужно использовать формулы (17) и (18).

Из формулы (23) следует, что при $\psi = \psi_y$ получим $c_n = c$. Тогда формулы (20) и (21) преобразуются к виду, который имеют формулы (23) и (28), представленные в [7] и описывающие структуру трехкомпонентной системы с изолированными включениями жидкости. Таким образом, формулы (20) и (21) обеспечивают плавный переход от структуры с непрерывными включениями жидкости к структуре с её изолированными включениями и наоборот. Кроме того, при отсутствии жидкой компоненты эти формулы приобретают вид, который имеют известные зависимости для системы с двумя взаимопроникающими компонентами [5] при адиабатическом

$$\frac{\lambda_a}{\lambda_1} = c^2 + v(1 - c)^2 + 2vc(1 - c)(vc + 1 - c)^{-1} \quad (24)$$

и изотермическом

$$\frac{\lambda_u}{\lambda_1} = \left[\frac{1 - c}{c^2 + v(1 - c^2)} + \frac{c}{c(2 - c) + v(1 - c)^2} \right]^{-1} \quad (25)$$

делении элементарной ячейки. Здесь $v = v_1 = \lambda_2/\lambda_1$.

Границы применения полученных формул

При установлении границ применения полученных формул будем использовать зависимость влагосодержания пор ψ_P от граничных значений ψ'_P и ψ''_P в следующем виде:

$$\psi_P = K(\psi'_P + \psi''_P), \quad (26)$$

где K – коэффициент, изменяющийся в пределах нижней $K_H = \psi'_P / (\psi'_P + \psi''_P)$ и верхней $K_B = \psi''_P / (\psi'_P + \psi''_P)$ границ. Очевидно, что $K_H + K_B = 1$.

Согласно принятым допущениям формулы (20) и (21), можно использовать при значениях коэффициента K от нижней границы K_H до некоторого K_m , при котором $C_n = C_x$. Нетрудно предположить, что результаты расчёта теплопроводности по формулам (20) и (21) будут отличаться от результатов, полученных по формулам (17) и (18), так как первые пренебрегают наличием газовой компоненты в центре элементарной ячейки, а вторые не учитывают неравномерное распределение жидкой компоненты. Представляло интерес определить значение K_m , до которого можно использовать формулы (20) и (21), и при этом K_m сравнить результаты, полученные по формулам (20), (21) и (17), (18). Аналогичные сравнения выполнить и при других значениях K из диапазона $K_H \leq K \leq K_B$. Для выяснения, сказанного по упомянутым формулам, были выполнены расчёты.

Эти расчёты были реализованы с использованием трёхкомпонентной системы с постоянной объёмной концентрацией твёрдого скелета $m_1 = 0,5$ ($c = 0,5$, $P = 1 - m_1 = 0,5$) и теплопроводностью $\lambda_1 = 1,0 \text{ Bm}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Теплопроводность газовой $\lambda_2 = 0,03 \text{ Bm}/(\text{m} \cdot \text{K})$ и жидкой $\lambda_3 = 0,6 \text{ Bm}/(\text{m} \cdot \text{K})$ компонент также были постоянными, а их концентрации изменялись в зависимости от влагосодержания системы. Угол смачивания θ на основе данных работ [8] и [9] был принят равным 45° .

Вначале определим граничные значения влагосодержания по ψ'_P и ψ''_P при угле смачивания $\theta = 45^\circ$.

Согласно [8]

$$\psi'_P = (1 - 8c) / [6(1 + 2c)] = 0,4167. \quad (27)$$

В соответствии с [7]

$$\psi''_P = (5 + 13c) / [6(1 + 2c)] = 0,9583. \quad (28)$$

Затем вычислим влагосодержание в узле ячейки $\psi_y = \psi'_P P = 0,20835$. Из решения кубического уравнения (22) нашли значение $c_x = 0,8368$. Задав K из диапазона $K_H \leq K \leq K_B$, по уравнению (26) вычислим влагосодержание пор ψ_P , по которому определим концентрацию жидкой компоненты $m_3 = \psi_P P = \psi$, и далее по уравнению (23) определим C_n . Методом последовательных приближений подобрали $K_m = 0,6237$, при котором $C_n = C_x$ (точность 0,0001). При этом K_m найдены значения концентраций $m_3 = 0,4288$ и $m_2 = P - m_3 = 0,0712$. Далее по формулам (20) и (21) определили теплопроводность $\lambda_a = 0,6149 \text{ Bm}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\lambda_u = 0,7324 \text{ Bm}/(\text{m} \cdot \text{K})$ и оценку эффективной теплопроводности трёхкомпонентной системы $\lambda = 0,5(\lambda_a + \lambda_u) = 0,6736 \text{ Bm}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

При тех же концентрациях компонент по формулам (17) и (18) были найдены соответствующие теплопроводности

$\lambda_a = 0,6163 \text{ Bm}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\lambda_u = 0,7324 \text{ Bm}/(\text{m} \cdot \text{K})$ и $\lambda = 0,5(\lambda_a + \lambda_u) = 0,6858 \text{ Bm}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Последний результат для λ превышал предыдущий $\lambda = 0,6736 \text{ Bm}/(\text{m} \cdot \text{K})$ на 1,77 %. Наименьшее превышение на 1,1 % наблюдалось при $K = 0,52$, а наибольшее оказалось на нижней границе $K = K_H = 0,303$ и составило 9,68 %. На верхней границе $K = K_B = 0,697$ относительная разница равна 2,22 %. К аналогичным выводам пришли после выполнения расчётов и при других значениях параметров c и θ . С физической точки зрения более точный результат при $K_H \leq K \leq K_m$ должны давать формулы (20) и (21). Формулы (17) и (18) можно использовать в довольно узком диапазоне коэффициентов K от K_m до K_B .

Подготовка исходных данных для расчёта и примеры расчёта

Для выполнения расчётов по полученным формулам необходимо знать объёмные концентрации компонент m_i и их теплопроводности λ_i . При известной плотности ρ и влагосодержании ψ материала, а также плотности твёрдого скелета ρ_s , которую можно определить с помощью пикнометрии, концентрации компоненты m_i определяются довольно просто: $m_1 = \rho / \rho_s$, $m_3 = \psi$ и $m_2 = 1 - m_1 - m_3$.

Теплопроводность воды $\lambda_3 \text{ Bm}/(\text{m} \cdot \text{K})$, (жидкая компонента) легко найти по формуле, полученной путём аппроксимации данных [11]

$$\lambda_3 = 0,552 + 0,256 \cdot 10^{-2} t - 0,124 \cdot 10^{-4} t^2, \quad (29)$$

где t – температура, $^\circ\text{C}$.

Теплопроводность паровоздушной смеси λ_2 (газовая компонента) складывается из теплопроводности сухого воздуха λ_{air} и теплопроводности пара λ_v , вызванной диффузионным переносом пара в поровом пространстве. Первое слагаемое определяется по формуле [6]

$$\lambda_{air} = 0,0257 [1 + 0,003(t - 20)]. \quad (30)$$

Значение λ_v определяется по формуле [5], базирующейся на зависимости Кришера [12],

$$\lambda_v = \frac{D}{\mu} \cdot \frac{M}{RT} \cdot \frac{P_{va}}{P_{va} - P_v} \cdot \frac{dP_v}{dt} q_t, \quad (31)$$

где D – коэффициент диффузии водяного пара в неподвижном воздухе, m^2/c ;

μ – коэффициент сопротивления диффузии пара через поровое пространство;

M – молекулярная масса водяного пара, $\text{кг}/\text{моль}$;

R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{K})$;

T – температура водяного пара, K ;

P_{va} – суммарное давление водяного пара и воздуха, Па ;

P_v – парциальное давление водяного пара, Па ;

q_t – удельная теплота парообразования при температуре t , $\text{Дж}/\text{кг}$.

При определении коэффициента диффузии водяного пара, обычно используют формулу [12, 13]

$$D = \frac{2,305 \cdot 10^{-5}}{\rho_{va}} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81}, \rho_0 = 101323 \text{ Па}, \quad (32)$$

предложенную Схирмером (R. Schirmer) в 1938 г.

Производную dp_v/dt можно определить с помощью справочных данных или по формуле [12]

$$\frac{dp_v}{dt} = \frac{2,44314 \cdot 10^6}{(234,175 + t)^2} \cdot \exp\left(\frac{17,08085t}{234,175 + t}\right), \quad (33)$$

$(0^\circ \leq t \leq 109,9^\circ\text{C})$.

Температурная зависимость удельной теплоты парообразования после аппроксимации справочных данных имеет вид:

$$q_t = (2,5 - 0,0024t) \cdot 10^6. \quad (34)$$

Коэффициент сопротивления диффузии пара μ при непрерывной газовой компоненте (рисунок 2, $m_2 > c_r^3$), согласно [8, 14], можно определить по формуле

$$\mu = \frac{m_2}{c_r^4}, \quad (35)$$

где c_r вычисляется по формуле (14), в которую вместо концентрации твёрдой компоненты m_1 подставляется концентрация газовой компоненты m_2 . Для замкнутых газовых включений (рисунок 1, $m_2 = c_r^3$) $\mu = 1,0$.

Теплопроводность твёрдой компоненты λ_1 в первом приближении можно определить с помощью зависимостей (24) и (25), в которых λ_a и $\lambda_{и}$ принимаются равными теплопроводности сухого материала λ_0 и затем методом итераций находятся значения теплопроводности твёрдого скелета при адиабатическом λ_1^a и изотермическом λ_1^u делении элементарной ячейки. Для последующих расчётов принимается среднее значение $\lambda_1 = 0,5(\lambda_1^a + \lambda_1^u)$.

Особенности расчёта эффективной теплопроводности влажного капиллярно-пористого материала по представленным формулам продемонстрируем на примере с использованием опытных данных, полученных нами для обыкновенного (полнотелого) глиняного кирпича.

Для трех образцов кирпича при температуре 20°C были определены следующие средние значения: плотность $\rho = 1640 \text{ кг/м}^3$, плотность твёрдого скелета $\rho_s = 2650 \text{ кг/м}^3$, влагосодержание в состоянии свободного водонасыщения $\psi_w = 0,291$, теплопроводность сухого материала $\lambda_0 = 0,74 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и влажного $\lambda_w = 1,107 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ при ψ_w . Теплопроводность образцов материала определялась согласно норме PN-EN1745:2012.

С помощью этих данных определены объёмные концентрации компонент: твёрдой $m_1 = \rho/\rho_s = 0,6189$, жидкой $m_3 = \psi_w = 0,291$ и газовой $m_2 = 1 - m_1 - m_3 = 0,0901$. Теплопроводность твёрдой компоненты найдена упомянутым выше методом последовательных приближений и равнялась $\lambda_1 = 1,75 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Теплопроводность воды $\lambda_3 = 0,597 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ была вычислена по формуле (29). При определении теплопроводности газовой компоненты λ_2 нужно учитывать ее структурные особенности. В водонасыщенных материалах жидкость заполняет мелкие капиллярные поры, а оставшиеся крупные поры следует рассматривать как замкнутые включения паровоздушной смеси. Теплопроводность сухого воздуха $\lambda_{air} = 0,0257 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ вычислена по формуле (30). Теплопроводность пара $\lambda_v = 0,0705 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ найдена с помощью формул (31) — (34) при коэффициенте сопротивления диффузии пара через замкнутое поровое пространство

$$\mu = 1. \text{ Тогда } \lambda_2 = \lambda_{air} + \lambda_v = 0,0962 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К}).$$

Отметим, что в рамках принятой геометрической модели структуры материала с замкнутыми газовыми включениями (рисунок 1) при $m_2 = 0,0901$ геометрический параметр $c_e = \sqrt[3]{m_2} = 0,4483 > 1 - c$

и определить теплопроводность трехкомпонентной системы по формулам (8) и (13) нельзя. В этом особом случае теплопроводность трехкомпонентной системы с замкнутыми газовыми включениями определим с использованием двух последовательных бинарных систем [5,7]. В начале определяется теплопроводность бинарной системы, состоящей из твёрдого скелета и жидкости; затем определяется эффективная теплопроводность всего материала.

Имеем объёмные концентрации взаимопроникающих компонент первой бинарной системы: твёрдой $m_1 = m_1/(m_1 + m_3) = 0,6802$ и жидкой $m_1 = m_3/(m_1 + m_3) = 0,3198$, где $m_1 + m_2 = 0,9099$. При m_1 по формуле (14) определим геометрический параметр твёрдого скелета $c = 0,6225$ и отношение $v = \lambda_3/\lambda_1 = 0,597/1,75 = 0,34114$. Далее по формулам (24) и (25) определяем значение $\lambda_a = 1,23889 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и $\lambda_{и} = 1,32684 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, среднее которых даёт значение эффективной теплопроводности первой бинарной системы $\lambda' = 1,28236 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Теплопроводность следующей бинарной системы с изолированными газовыми включениями определим с использованием формул работы [5], полученных для элементарной ячейки в виде куба в кубе.

При дроблении этой ячейки адиабатическими плоскостями получена зависимость

$$\frac{\lambda_a}{\lambda_{и}} = \frac{v - (v - 1)(1 - m_2^{2/3})m_2^{1/3}}{v - m_2^{1/3}(v - 1)}, \quad (36)$$

а при дроблении изотермическими плоскостями имеем:

$$\frac{\lambda_{и}}{\lambda_1} = \frac{1 + (v - 1)m_2^{2/3}}{1 + (v - 1)m_2^{2/3}(1 - m_2^{1/3})}. \quad (37)$$

Расчёты по этим формулам с использованием полученных данных $\lambda_1 = \lambda' = 1,28236 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $v = \lambda_2/\lambda_1 = 0,075018$; $m_2 = 0,0901$ дали следующие результаты: $\lambda_a = 1,064 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и $\lambda_{и} = 1,1633 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Расчетная эффективная теплопроводность материала $\lambda = 0,5(\lambda_a + \lambda_{и}) = 1,1136 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ оказалась больше опытной на 0,6 %.

При влагосодержании материала $0 < \psi < \psi_w$ объём мелких капиллярных пор делится на две части. Одна часть заполнена жидкостью, а другая – паровоздушной смесью. Тогда, с учетом объёма твёрдого скелета, получим трехкомпонентную систему, расчет теплопроводности которой, согласно [7], целесообразно выполнять без ее деления на две бинарные системы. Это можно реализовать с помощью формул (20) и (21) или их преобразований, учитывающих структурные изменения трехкомпонентной элементарной ячейки при $c_n = c$ и $c_n \geq c_x$ и описанных выше. Теплопроводность всего материала определяется по формулам (36) и (37). После расчетов при значениях влагосодержания из указанного диапазона установлено, что зависимость теплопроводности материала близка линейной.

Рассмотрим еще два примера расчета теплопроводности влажного капиллярно-пористого материала с использованием опытных данных, приведенных в [15] для глиняного кирпича плотностью 1600 и 1820 кг/м³. Однако в этой работе отсутствовали значения плотности скелета ρ_s , что не позволяло выполнить расчет теплопроводности материала по предлагаемому двухэтапному методу.

Для определения плотности скелета глиняного кирпича нами по данным восьми пар значений плотности ρ от 1360 до 2120 кг/м³ и плотности ρ_s от 2604 до 2730 кг/м³ было построено линейное уравнение регрессии.

$$\rho_s = 2388 + 0,162\rho. \quad (38)$$

Для оценки эффективности этого уравнения был использован опытный F-критерий Фишера, который определялся как отношение рассеяния данных относительно среднего выборочного со степенью свободы $v_1 = 8 - 1 = 7$ к рассеянию относительно уравнения (38)

со степенью свободы $\nu_2 = 8 - 2 = 6$. Это отношение оказалось равным $F = 4,63$ и при уровне значимости $\alpha = 0,05$ превышало критическое значение $F_{0,05;7;6} = 4,21$. Следовательно уравнение (38) эффективно с доверительной вероятностью 0,95. Кроме того, выборочный коэффициент корреляции $r = 0,906$ близок к 1,0 и поэтому зависимость между ρ_s и ρ является практически линейной.

По данным работы [15] глиняный кирпич плотностью $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$ в сухом состоянии имел теплопроводность $\lambda_0 = 0,63 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, а в водонасыщенном состоянии ($\psi_w = 0,3$) она составляла $\lambda_w = 1,02 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Плотность скелета материала $\rho_s = 2647 \text{ кг/м}^3$ была определена по формуле (38). Соответственно, для глиняного кирпича плотностью $\rho = 1820 \text{ кг/м}^3$ имели: $\lambda_0 = 0,69 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\lambda_w = 1,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ при $\psi_w = 0,23$ и $\rho_s = 2683 \text{ кг/м}^3$. Остальные исходные данные, как и в первом примере, были определены расчетным путем.

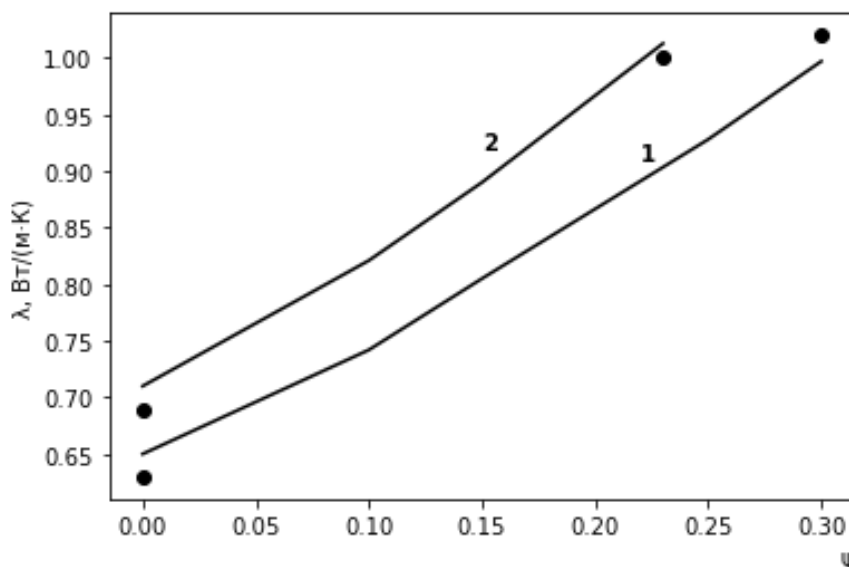


Рисунок 4 – Зависимость эффективной теплопроводности λ глиняного кирпича различной плотности от влагосодержания ψ 1 – $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$; 2 – $\rho = 1820 \text{ кг/м}^3$; кружки – опытные данные

Заключение

Построен ряд зависимостей для определения эффективной теплопроводности влажных капиллярно-пористых материалов, влагосодержание пор которых при свободном впитывании жидкости может измениться от гигроскопического вплоть до насыщения. Эти материалы рассматривались как неоднородные трехкомпонентные системы, состоящие из твердого скелета, газа (паровоздушной смеси) и жидкости (вода). При анализе переноса тепла в таких системах одновременно учитывались теплопроводности и объемные концентрации всех компонент и использовались методы теории обобщенной проводимости, а структура твердого скелета моделировалась упорядоченной структурой из одинаковых элементарных ячеек наиболее простой кубической формы.

Изменения бинарной структуры из взаимосвязанных жидкости и газа отслеживались по мере заполнения пор жидкостью. Вначале имеем изолированные включения жидкости, затем непрерывные компоненты жидкости и газа и, наконец, замкнутые включения газа. Геометрическая модель элементарной трехкомпонентной ячейки каждой из этих структур описывалась согласно теории протекания и для каждой элементарной ячейки были построены зависимости для определения её теплопроводности при адиабатическом и изотермическом делении и определены границы их применения.

С физической и практической точек зрения целесообразно в первую очередь использовать формулы (20) и (21), которые

Результаты расчетов теплопроводности глиняного кирпича вплоть до водонасыщения по предлагаемому методу, особенности которого подробно описаны в первом примере, и опытные данные приведены на рисунке 4, из которого видно, что результаты расчета достаточно точно предсказывают опытные данные. Так, для водонасыщенного кирпича плотностью $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$ результаты расчета превышают опытные значения на 2,25 %, а для кирпича плотностью $\rho = 1820 \text{ кг/м}^3$ меньше опытного на 1,27 %. В первом примере эта разница составила лишь +0,6 %. Из рисунка 4 следует, что в первом приближении расчетную зависимость λ от ψ можно принять линейной. Это вполне соответствует линейным зависимостям, построенным по многочисленным опытным данным и представленным в различных работах, например [15,16].

обеспечивают плавный переход от структуры с непрерывными включениями жидкости к структуре с её изолированными включениями и наоборот и позволяют определить теплопроводность влажного материала вплоть до состояния свободного насыщения водой. Рассмотрена подготовка исходных данных для расчёта. Особенности расчёта по предложенным формулам продемонстрированы на примерах с использованием опытных данных для глиняного кирпича. Установлено, что предложенный метод расчета способен с достаточной точностью прогнозировать теплопроводность влажных капиллярно-пористых стеновых материалов.

Список цитированных источников

1. Blocken, B. J. A review of wind-driven rain research in building science / B. J. Blocken, J. E. Carmeliet // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2004. – № 92 (13). – P. 1079–1130.
2. Künzle, H. M. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameter / H. M. Künzle. – Stuttgart: IRB Verlag, 1995.
3. Evaluation of the influence of wind-driven rain in moisture in cellular concrete wall boards / A. Alsabry [et al.] // Int. J. Appl. Mech. Eng. – 2017. – № 22. – P. 509–519.
4. Blocken, B. J. On the validity of the cosine projection in wind-driven rain calculations on buildings / B. J. Blocken, J. E. Carmeliet // Building and Environment. – 2006. – № 41 (9). – P. 1182–1189.

5. Дульнев, Г. Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г. Н. Дульнев, В. В. Новиков. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.
6. Гурьев, В. В. Тепловая изоляция в промышленности. Теория и расчет / В. В. Гурьев, В. С. Жолудов, В. Г. Петров-Денисов. – М. : Стройиздат, 2003. – 416 с.
7. Alsabry, A. Dependencies for determining the thermal Conductivity of moist capillary-porous materials / A. Alsabry, B. Backiel-Brzozowska, V. I. Nikitsin // *Energies*. – 2020. – № 13. – P. 3211.
8. A model of moist polymer foam and a scheme for the calculation of its thermal conductivity / V. I. Nikitsin [et al.] // *Energies*. – 2020. – № 13. – P. 520.
9. Janz, M. Methods of measuring the moisture diffusivity of high moisture levels. Report TVBM-3076, Division of Building Materials / M. Janz. – Lund : Lund Institute of Technology, 1997.
10. Nikitsin, V. I. Determination of capillary tortuosity coefficient in calculations of moisture transfer in building materials / V. I. Nikitsin, B. Backiel-Brzozowska // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2013. – № 56. – P. 30–34.
11. Gawin, D. Modelowanie sprzężonych zjawisk ciepno-wilgotnościowych w materiałach i elementach budowlanych / D. Gawin. – Łódź : Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2000.
12. Ochs, F. Effective thermal conductivity of moisture isolation as a function of temperature / F. Ochs, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2008. – № 51. – P. 539–552.
13. Sheffer, G. A whole range higric material model. Modeling liquid and vapour transport properties in porous media / G. Sheffer, R. Plagge // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2010. – № 53. – P. 286–296.
14. Epstein, N. On tortuosity and tortuosity factor in flow and diffusion through porous media / N. Epstein // *Chemical Eng. Science*. – 1989. – № 44 (3). – P. 777–779.
15. Wyrwal, J. Problemy zawilgocenia przegród budowlanych / J. Wyrwal, J. Świrska. – Warszawa : Komitet Inżynierii Łądowej i Wodnej PAN, 1998. – 108 s.
16. Ясин, Ю. Д. Влияние плотности, влажности и количества криофазы на теплофизические свойства строительных материалов / Ю. Д. Ясин, Н. Н. Кузнецова // *Строительные материалы*. – 1988. – № 7. – С. 24–25.
8. A model of moist polymer foam and a scheme for the calculation of its thermal conductivity / V. I. Nikitsin [et al.] // *Energies*. – 2020. – № 13. – P. 520.
9. Janz, M. Methods of measuring the moisture diffusivity of high moisture levels. Report TVBM-3076, Division of Building Materials / M. Janz. – Lund : Lund Institute of Technology, 1997.
10. Nikitsin, V. I. Determination of capillary tortuosity coefficient in calculations of moisture transfer in building materials / V. I. Nikitsin, B. Backiel-Brzozowska // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2013. – № 56. – P. 30–34.
11. Gawin, D. Modelowanie sprzężonych zjawisk ciepno-wilgotnościowych w materiałach i elementach budowlanych / D. Gawin. – Łódź : Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2000.
12. Ochs, F. Effective thermal conductivity of moisture isolation as a function of temperature / F. Ochs, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2008. – № 51. – P. 539–552.
13. Sheffer, G. A whole range higric material model. Modeling liquid and vapour transport properties in porous media / G. Sheffer, R. Plagge // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2010. – № 53. – P. 286–296.
14. Epstein, N. On tortuosity and tortuosity factor in flow and diffusion through porous media / N. Epstein // *Chemical Eng. Science*. – 1989. – № 44 (3). – P. 777–779.
15. Wyrwal, J. Problemy zawilgocenia przegród budowlanych / J. Wyrwal, J. Świrska. – Warszawa : Komitet Inżynierii Łądowej i Wodnej PAN, 1998. – 108 s.
16. Yasin, Yu. D. Vliyanie plotnosti, vlazhnosti i kolichestva kriofazy na teplofizicheskie svojstva stroitel'nyh materialov / Yu. D. Yasin, N. N. Kuznecova // *Stroitel'nye materialy*. – 1988. – № 7. – S. 24–25.

Материал поступил в редакцию 17.05.2022

References

1. Blocken, B. J. A review of wind-driven rain research in building science / B. J. Blocken, J. E. Carmeliet // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2004. – № 92 (13). – P. 1079–1130.
2. Künzeli, H. M. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameter / H. M. Künzeli. – Stuttgart : IRB Verlag, 1995.
3. Evaluation of the influence of wind-driven rain in moisture in cellular concrete wall boards / A. Alsabry [et al.] // *Int. J. Appl. Mech. Eng.* – 2017. – № 22. – P. 509–519.
4. Blocken, B. J. On the validity of the cosine projection in wind-driven rain calculations on buildings / B. J. Blocken, J. E. Carmeliet // *Building and Environment*. – 2006. – № 41 (9). – P. 1182–1189.
5. Dul'nev, G. N. Processy perenosa v neodnorodnyh sredah / G. N. Dul'nev, V. V. Novikov. – L. : Energoatomizdat, 1991. – 248 s.
6. Gur'ev, V. V. Teplovaya izolyaciya v promyshlennosti. Teoriya i raschet / V. V. Gur'ev, V. S. Zholudov, V. G. Petrov-Denisov. – M. : Strojizdat, 2003. – 416 s.
7. Alsabry, A. Dependencies for determining the thermal Conductivity of moist capillary-porous materials / A. Alsabry, B. Backiel-Brzozowska, V. I. Nikitsin // *Energies*. – 2020. – № 13. – P. 3211.