

13. Nadol'skij V. V. Ocenka nesushhej sposobnosti balok s gofrirovannoj stenкой meto-dom konechnyh jelementov pri dejstvii lokal'noj nagruzki. /V. V. Nadol'skij, A.I. Vihljaev // Vestnik MGSU. – 2022. – T. 17. – Vyp. 6. – S. 693–706.

14. Nadol'skij, V.V. Problemy realizacii strategii lokalizacii razrushenija v sledstvii osobogo vozdejstvija primenitel'no k stal'nym konstrukcijam. Nadol'skij V. V., Tur A. V., Konashkov A. O. //, Teorija i praktika issledovanij i proektirovanija v stroitel'stve s primeneniem sistem avtomatizirovannogo proektirovanija (SAP): sbornik statej II Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii. – Brest: Izdatel'stvo BrGTU, 2018. – S.99-109.

15. Nadol'skij V.V. Vosprijatie osobogo vozdejstvija v zdaniyah so stal'nym kar-kasom i perekrytiem iz sbornyh zhelezobetonnyh mnogopustotnyh plit / V.V. Nadol'skij, A.O. Konashkov // Perspektivnye napravlenija innovacionnogo razvitija stroitel'stva i podgotovki inzhenernyh kadrov: sbornik nauchnyh statej XXI Mezhdunarodno-go nauchno-metodicheskogo seminaru / BrGTU; redkol.: N.N. Sha-lobyta [i dr.]. – Brest: BrGTU, 2018. –Ch. 1 – S. 217-22.

16. ТКР EN 1991-1-7-2009 Evrokod 1. Vozdejstvija na konstrukcii. Chast' 1-7. Obshhie vozdejstvija. Osobyje vozdejstvija. – M: MAiS, 2010. - 47с.

УДК 691:536.2

УЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ РАСЧЕТЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВЛАЖНЫХ ГАЗОСИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. И. Никитин¹, Б. Бацкель-Бжозовска², С. К. Никитин³

*¹ Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной механики
УО «Брестский государственный технический университет»,
Брест, Беларусь, e-mail : nik_ol40@mail.ru*

*² Кандидат технических наук, Строительный факультет «Белостокский политехнический
институт», Белосток, Польша, e-mail : b.backiel@pb.edu.pl*

*³ Студент, Факультет электронно-информационных систем УО «Брестский государствен-
ный технический университет», Брест, Беларусь,
e-mail : sniki@protonmail.com*

Реферат

Поровое пространство газосиликатных материалов независимо от плотности, представлено крупными порами, образовавшимися в результате газообразования и мелкими капиллярными порами. При впитывании жидкой влаги заполняются только капиллярные поры. Крупные поры содержат паровоздушную смесь. Учитывая такое дву模альное распределение пор по размерам, предлагается двух-этапный метод расчета теплопроводности материала. Вначале следует рассма-тривать неоднородную трехкомпонентную систему, состоящую из твердого ске-лета, в мелкопористой части которого находится газ и жидкая влага. Затем учи-тывается бинарная система, первой компонентой которой является упомянутая трехкомпонентная система, а второй — изолированные включения газа в круп-ных порах. Теплопроводности трехкомпонентной и бинарной системы опреде-лялись с помощью зависимостей, построенных с помощью теории обобщенной

проводимости. Установлено, что результаты расчета теплопроводности газосиликатных материалов по предлагаемому методу практически совпадают с полученными опытными значениями. А расчеты, выполненные без учета двуимодального распределения размера пор, дают результаты существенно меньше опытных данных.

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

ACCOUNTING FOR FEATURES OF A POROUS STRUCTURE IN CALCULATING THE THERMAL CONDUCTIVITY OF WET GAS-SILICATE MATERIALS

V. I. Nikitin, B. Backiel-Brzozowska, S. K. Nikitin

Abstract

The pore space of gas silicate materials, regardless of density, is represented by large pores formed as a result of gas formation and small capillary pores. When liquid moisture is absorbed, only capillary pores are filled. Large pores contain a vapor-air mixture. Taking into account such a bimodal pore size distribution, a two-stage method for calculating the thermal conductivity of a material is proposed. First, one should consider an inhomogeneous three-component system consisting of a solid skeleton, in the finely porous part of which there is gas and liquid moisture. Then, a binary system is taken into account, the first component of which is the mentioned three-component system, and the second one is isolated gas inclusions in large pores. The thermal conductivities of the ternary and binary systems were determined using dependencies constructed using the theory of generalized conductivity. It has been established that the results of calculating the thermal conductivity of gas silicate materials using the proposed method practically coincide with the experimental values obtained. And the calculations performed without taking into account the bimodal pore size distribution give results that are significantly less than the experimental data.

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

Введение

Газосиликатные материалы широко используются при возведении наружных стен зданий и сооружений и в сухом состоянии имеют сравнительно низкий коэффициент эффективной теплопроводности. Однако в процессе эксплуатации зданий влагосодержание газосиликатных материалов может существенно повыситься. Так, в работе [1] путем натурального и вычислительного экспериментов установлено, что среднее влагосодержание газосиликатной панели отопляемого здания превысило нормируемое значение в 4-5 раз. Это приводило к повышению теплопроводности материала и снижению теплоизолирующих свойств ограждения.

Одна из причин переувлажнения ограждающих конструкций – одновременное воздействие атмосферных осадков и ветра на рассматриваемую наружную поверхность ограждения, называемое косым дождем [1-4]. Влагосодержание материала наружного слоя ограждения при косом дожде зависит от его интенсивности и продолжительности, а также особенностей поровой структуры материала и может повышаться вплоть до капиллярного водонасыщения [4].

Результаты измерений пористой структуры образцов газосиликата [5-7] показали, что в дифференциальном распределении пор по размерам, независимо от плотности образцов, присутствовало два максимума. Из анализа этих данных следовало, что пористость рассмотренных образцов, в основном, представлена мелкими капиллярными порами ($\approx 10^{-7}$ м) и крупными порами газообразования ($\approx 10^{-4}$ м). При свободном капиллярном впитывании жидкая влага заполняет только мелкие поры, а крупные поры заполнены паровоздушной смесью. По данным наших опытов значения водопоглощения образцов газосиликата плотностью 447 – 614 кг/м³ не превышали половины их пористости. Подобное соотношение наблюдалось и у образцов газосиликата плотности 363 и 407 кг/м³ [8]. Представляется, что в таких случаях определение эффективной теплопроводности газосиликатных материалов нужно выполнять в два этапа. Вначале следует рассматривать неоднородную трехкомпонентную систему, состоящую из твердого скелета (1), в мелкопористой части которого находится газ (2) и жидкая влага (3). Затем учитывать бинарную систему, первой компонентой которой является упомянутая трехкомпонентная система, а второй – изолированные включения газа в крупных порах. К настоящему времени нам неизвестен такой подход к расчету эффективной теплопроводности газосиликатных материалов.

В данной работе представлен двухэтапный метод расчета эффективной теплопроводности материалов, имеющих двумодальное распределение размеров пор. Для определения теплопроводности неоднородной трехкомпонентной системы были использованы зависимости, построенные с помощью методов теории обобщенной проводимости в сочетании с геометрическим моделированием структуры путем перехода к элементарной ячейке [9]. Теплопроводность бинарной системы с изолированными включениями газа вычислялась по известным формулам, приведенным в [10]. Установлено, что результаты расчета теплопроводности газосиликатных материалов по предложенному методу практически совпадают с полученными опытными значениями, а расчеты, выполненные без учета двумодального распределения размера пор дают результаты существенно меньше опытных данных.

2. Геометрическая модель неоднородной трехкомпонентной системы и зависимости для определения ее теплопроводности

При построении геометрической модели трехкомпонентной системы нужно знать объемные концентрации её компонент m_i . Объем образца газосиликатного материала V складывается из объема твердого скелета V_s , объема мелких V_{sp} и крупных V_{bp} пор. Объем рассматриваемой в данном случае трехкомпонентной системы V' равен сумме $V_s + V_{sp}$. Объем твердого скелета V_s можно определить с помощью пикнометрии, а объем мелких пор V_{sp} приравнять объему жидкой влаги, впитанной образцом материала при его погружении в воду V_{sat} . Объем мелких пор $V_{sp} = V_{sat}$ заполняется жидкой влагой объема $V_w \leq V_{sp}$. В результате

получим следующие значения интересующих нас объемных концентраций компонент: твердой $m_1 = V_s / V'$, жидкой $m_3 = V_w / V' = \psi_w$ (ψ_w - влагосодержание трехкомпонентной системы) и газовой $m_2 = (V_{sp} - V_w)/V' = P_{sp} - \psi_w$, где $P_{sp} = V_{sp} / V' = V_{sat}/V'$ - пористость трехкомпонентной системы.

Если объем жидкости V_w не превышает некоторого граничного значения V_w' , то жидкость распределена в порах в виде изолированных включений. Данный случай подробно описан в работе [11] и далее будем рассматривать трехкомпонентную систему, у которой $V_w > V_w'$. В общем случае структуру такой системы, согласно [9,10], можно представить в виде восьмой части элементарной ячейки, приведенной на рис.1. Из рис. 1 видно, что объем жидкости V_w , смачивающей стержни твердого скелета размера Δ , можно условно поделить на две части, характеризующиеся размерами Δ_x и Δ_n . Принято, что значение Δ_x остается неизменным при изменении влагосодержания пор. Обоснование этого предположения приведено в работе [10].

Размер Δ_x связан с объемом жидкости V_k в узле решетки скелета $V_k = (\Delta_x = \Delta)^3 + 3\Delta(\Delta_x - \Delta)^2$. Обозначив разницу $(\Delta_x - \Delta) = x$, получим соотношение $V_k = x^3 + 3\Delta x^2$. После деления левой и правой части этого соотношения на объем элементарной ячейки $V = L^3$ получим кубическое уравнение, связывающее объемную концентрацию жидкости в узле решетки $\psi_k = V_k/L^3$ с геометрическими параметрами $c = \Delta/L$ и $d = x/L = \Delta_x/L - \Delta/L = c_x - c$

$$\Psi_k = d^3 + 3cd^2 \quad (1)$$

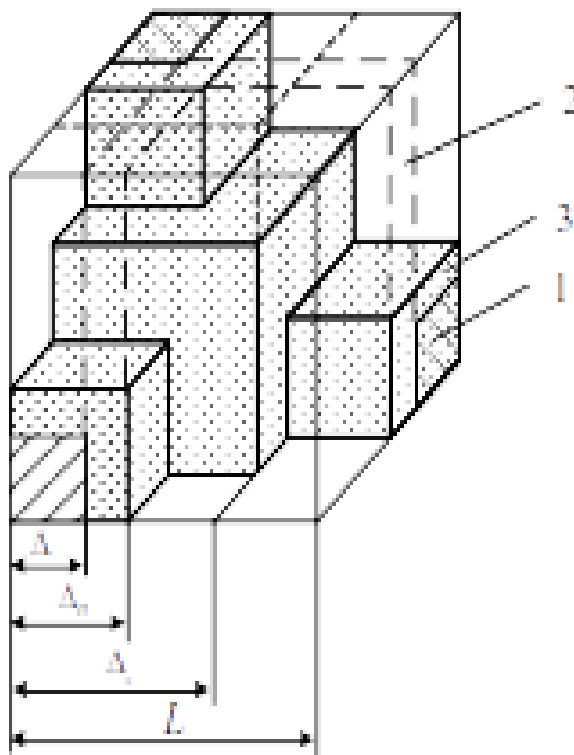


Рис. 1 Восьмая часть элементарной ячейки с непрерывными включениями жидкости

1,2,3 — твердая, газовая и жидкая компоненты.

Значение c зависит от объемной концентрации твердого скелета и определяется по формуле [12].

$$c = 0.5 + \sin \left[\frac{\arcsin(2m_1 - 1)}{3} \right] \quad (2)$$

Объемная концентрация жидкости в узле решетки ψ_k определяется по формуле

$$\psi_k = \psi'_p p_{sp} \quad (3)$$

где $\psi'_p = V_w/V_{sp}$ - граничное значение влагосодержания пор, при котором происходит переход от изолированных включений жидкости к непрерывным и наоборот.

Согласно [11,13], значение ψ'_p зависит от c и угла смачивания θ , Например при

$\theta = 45^\circ$ имеем

$$\psi'_p = \frac{1 + 8c}{6(1 + 2c)} \quad (4)$$

При известных значениях ψ_k и c из уравнения (1) определяем положительный и физически оправданный корень d . Тогда геометрический параметр $c_x = c + d$.

Другая часть объема жидкости равна $V_n = V_w - V_k = 3(\Delta_n^2 - \Delta^2)(L - \Delta_x)$. (см. рис 1) После деления левой и правой части этого соотношения на объем элементарной ячейки $V = L^3$ получим квадратное уравнение

$$\psi_n = \psi_w - \psi_k = 3(c_n^2 - c^2)(1 - c_x) \quad (5)$$

решая которое находим геометрический параметр c_n .

Таким образом, при известных объемных концентрациях компонент трехкомпонентной системы, а также заданном угле смачивания θ можно определить параметры структуры рассматриваемой геометрической модели (рис. 1).

При делении элементарной ячейки (рис. 1) адиабатическими плоскостями параллельными потоку тепла в работе [9] была получена зависимость, дающая нижнюю оценку теплопроводности трехкомпонентной системы

$$\begin{aligned} \frac{\lambda'_a}{\lambda_1} = & c^2 + v^2(c_n - c)^2 + \frac{2v_2c(c_n - c)}{1 - c + v_2c} + \frac{2v_1v_2c(c_x - c_n)}{v_2(1 - c_x) + v_1(c_x - c) + v_1v_2c} + \frac{2v_1v_2(c_n - c)(c_x - c_n)}{v_2(1 - c_x) + v_1c_x} \\ & + \frac{v_1v_2(c_x - c_n)^2}{v_2(1 - c_x) + v_1c_x} \\ & + \frac{2v_1v_2c(1 - c_x)}{v_2(1 - c_n) + v_1(c_n - c) + v_1v_2c} + \frac{2v_1v_2(c_n - c)(1 - c_x)}{v_2(1 - c_n) + v_1c_n} + v_1[(1 - c^2) - (c_x - c_n)^2] \end{aligned} \quad (6)$$

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

При дроблении той же элементарной ячейки изотермическими плоскостями перпендикулярными тепловому потоку получили зависимость для определения верхней оценки теплопроводности трехкомпонентной системы λ'_u [9].

$$\frac{\lambda'_{и}}{\lambda_1} = \frac{1-c_x}{c^2+v_2(c_n^2-c^2)+v_1(1-c_n^2)} + \frac{c_x-c_n}{c^2+v_2(c_x^2-c^2)+v_1(1-c_x^2)} + \frac{c_n-c}{c^2+v_2[2c_n(1-c_x)+(c_x^2-c^2)]+v_1[1-c_x^2-2c_n(1-c_x)]} + \frac{c}{c(2-c)+v_2[2(c_n-c)(1-c)-(c_n-c)^2+(c_x-c_n)^2]+v_1[(1-c_n)^2-(c_x-c_n)^2]} \quad (7)$$

где, как и в (6), $v_1 = \lambda_2/\lambda_1$, $v_2 = \lambda_3/\lambda$, $c = \Delta/L$, $c_n = \Delta_n/L$ и $c_x = \Delta_x/L$.

В качестве окончательной оценки эффективной теплопроводности трехкомпонентной системы принималось среднее арифметическое значение

$$\lambda' = 0.5(\lambda'_a + \lambda'_{и}) \quad (8)$$

Достаточно просто установить, что формулы (6) и (7) трансформируются в зависимости, полученные в работе [11] для замкнутых включений жидкости. Для случая $c_n=c_x$ формулы (6) и (7) преобразуются к виду, который имеют зависимости, построенные для равномерного распределения жидкости на поверхности стержней твердого скелета [11]. Однако при таком распределении жидкости не обеспечивается плавный переход к замкнутым включениям жидкости и сравнительные расчеты дают существенную разницу. Например, при угле смачивания $\theta=45^\circ$ и граничном влагосодержании пор $\psi_p'=0.417$, при концентрациях компонент системы $m_1=0.5$; $m_2=0.2915$; $m_3=0.2085$ и их теплопроводностях $\lambda_1=1.0$ Вт/(м·К), $\lambda_2=0.03$ Вт/(м·К), $\lambda_3=0.6$ Вт/(м·К) эффективная теплопроводность такой системы, найденная по формулам (6) и (7), равна $\lambda=0.4065$ Вт/(м·К), а по формулам работы [11] для равномерного распределения жидкости $\lambda=0.5455$ Вт/(м·К). С физической точки зрения первый результат, который на 25.5% ниже второго, дает более точную оценку.

Если материал сухой ($c_n=c$ и $c_x=c$), то зависимости (6) и (7) преобразуются к виду, который имеют известные формулы для системы с двумя взаимопроникающими компонентами [10] при адиабатическом

$$\frac{\lambda_a}{\lambda_1} = c^2 + v(1-c)^2 + 2vc(1-c)(vc+1-c)^{-1} \quad (9)$$

и изотермическом делении элементарной ячейки.

$$\frac{\lambda_{и}}{\lambda_1} = \left[\frac{1-c}{c^2+v(1-c^2)} + \frac{c}{c(2-c)+v(1-c)^2} \right]^{-1} \quad (10)$$

где $v = v_1 = \lambda_2/\lambda_1$

Для выполнения расчетов по формулам (6) и (7) наряду с объемными концентрациями компонент m_i необходимо знать их теплопроводности λ_i .

Теплопроводность твердой компоненты λ_1 в первом приближении можно определить с помощью зависимостей (9) и (10), в которых λ_a и $\lambda_{и}$ принимаются равными опытному значению теплопроводности сухого материала λ_{dry} и затем методом итераций находят теплопроводности твердой компоненты при адиабатическом λ_1^a и изотермическом $\lambda_1^и$ делении элементарной ячейки. Для последующего расчета принимается среднее значение $\lambda_1 = 0.5(\lambda_1^a + \lambda_1^и)$.

Теплопроводность паровоздушной смеси λ_2 (газовая компонента) складывается из теплопроводности сухого воздуха λ_{air} и теплопроводности пара λ_{ws} , вы-

званной диффузионным переносом пара в поровом пространстве. Первое слагаемое определяется по формуле [14]

$$\lambda_{air} = 0,0257 \left[1 + 0,003(t - 20) \right], \quad (11)$$

где t - температура, °C

Второе слагаемое определяется по формуле, базирующейся на зависимости Кришера [10,15],

$$\lambda_{ws} = \frac{D}{\mu} \cdot \frac{M}{RT} \cdot \frac{P_{va}}{P_{va} - P_v} \cdot \frac{dP_v}{dt} q_t \quad (12)$$

где D – коэффициент диффузии водяного пара в неподвижном воздухе, $\text{м}^2/\text{с}$;
 μ – коэффициент сопротивления диффузии пара через поровое пространство;

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

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

T – температура водяного пара, К ;

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 [15]

$$D = \frac{2,305 \cdot 10^{-5} \cdot p_0}{p_{va}} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81}, \quad p_0 = 101323 \text{ Па} \quad (13)$$

предложенную Схирмером (R. Schirmer) в 1938 г.

Производную dp_v/dt можно определить с помощью справочных данных или по формуле [15]

$$\frac{dp_v}{dt} = \frac{2,44314 \cdot 10^6}{(234,175 + t)^2} \cdot \exp\left(\frac{17,08085t}{234,175 + t} \right), \quad (0^\circ \leq t \leq 109,9^\circ \text{C}) \quad (14)$$

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

$$q_t = (2,5 - 0,0024t) \cdot 10^6 \quad (15)$$

Коэффициент сопротивления диффузии пара μ при непрерывной газовой компоненте, согласно [13,16], можно определить по формуле

$$\mu = \frac{m_2}{c_*^4}, \quad (16)$$

где c_* вычисляется по формуле (2), в которую вместо концентрации твёрдой компоненты m_1 подставляется концентрация газовой компоненты m_2 . Для замкнутых газовых включений $\mu = 1,0$ [10].

Теплопроводность жидкой компоненты λ_3 (вода) находится по формуле, полученной после аппроксимации данных работы [5],

$$\lambda_3 = 0,551 + 0,256 \cdot 10^{-2}t - 0,124 \cdot 10^{-4}t^2 \quad (17)$$

Сейчас по формулам (6) и (7) можно определить теплопроводности λ'_a , λ'_n и их среднее значение, $\lambda' = 0,5(\lambda'_a + \lambda'_n)$, которое принимается в качестве эффек-

тивной теплопроводности рассматриваемой на первом этапе расчета трехкомпонентной системы объема V' . Далее выполняется расчет бинарной системы.

3. Расчет бинарной системы

Бинарная система объема $V = V' + V_{bp}$ (V_{bp} - объем крупных пор), первой компонентой которой является рассмотренная трехкомпонентная система объема V' с теплопроводностью $\lambda_1 = \lambda'$ и объемной концентрацией $m_1 = V'/V$, а второй - замкнутые крупные поры с объемной концентрацией $m_2 = 1 - m_1$. Теплопроводность паровоздушной смеси крупных пор λ_2 определяется с помощью формул (13) - (16) при коэффициенте сопротивления диффузии пара $\mu=1$.

При определении теплопроводности бинарной системы можно использовать формулы работы [10], которые имеют вид:

- при дроблении элементарной ячейки адиабатическими плоскостями

$$\frac{\lambda_a}{\lambda_1} = \frac{\nu - (\nu - 1)(1 - m_2^{2/3}) \cdot m_2^{1/3}}{\nu - m_2^{1/3}(\nu - 1)} \quad (18)$$

- при дроблении той же ячейки изотермическими плоскостями

$$\frac{\lambda_{и}}{\lambda_1} = \frac{1 + (\nu - 1)m_2^{2/3}}{1 + (\nu - 1)m_2^{2/3} \cdot (1 - m_2^{1/3})} \quad (19)$$

где $\nu = \lambda_2/\lambda_1$.

Среднее значение $\lambda = 0.5(\lambda_a + \lambda_{и})$ даст оценку эффективной теплопроводности влажного материала, имеющего двумодальное распределение объема пор по размерам.

4. Результаты физического и вычислительного экспериментов

Для выяснения способности предлагаемого метода расчета теплопроводности газосиликатных материалов, имеющих двумодальное распределение пор по размерам, был выполнен эксперимент с использованием промышленных образцов газосиликата различной плотности ρ и одинакового объема V (24x24x5 см). Рассмотрено четыре серии образцов, каждая из которых состояла из трех образцов примерно одинаковой плотности ρ . С помощью пикнометрии определялась плотность твердого скелета ρ_s при которой вычислялась его объемная концентрация $m_s = \rho/\rho_s$ и пористость материала $P = 1 - m_s$. Водопоглощение материала $\psi_{sat} = V_{sat}/V$ находилось путем погружения образцов в воду. Теплопроводность сухих λ_{dry} и влажных λ_h образцов измерялась стационарным методом. Все измерения проводились при комнатной температуре $t \approx 20$ °С.

Значения опытных данных, которые необходимы для расчета эффективной теплопроводности влажных материалов λ , приведены в таблице 1. Особенности расчета этой теплопроводности рассмотрим с использованием данных, полученных для образцов первой серии, имеющих среднюю плотность $\rho = 447$ кг/м³ и теплопроводность во влажном состоянии $\lambda_h = 0.278$ Вт/(м · К) при влагосодержании $\psi = V_w/V = 0.232$, которое соответствует состоянию насыщения при свободном капиллярном впитывании воды.

Таблица 1. Средние опытные значения плотности ρ , плотности твердого скелета ρ_s , водопоглощения ψ_{sat} , пористости P и теплопроводности в сухом состоянии λ_{dry} образцов в четырех сериях

№ серии	ρ , кг/м ³	ρ_s , кг/м ³	ψ	P	λ_{dry} , Вт/(м · К)
1	447	1980	0.2924	0.7742	0.1189
2	530	2110	0.3004	0.7488	0.1399
3	577	2204	0.3215	0.7382	0.1496
4	614	2285	0.3451	0.7312	0.1601

На первом этапе расчета рассмотрим трехкомпонентную систему объема V' , состоящую из объема твердого скелета V_s и объема мелких пор $V_{sp} = V_{sat}$. Объемная концентрация этой системы в материале $m' = (V_s + V_{sat})/V = m_s + \psi_{sat} = 0.5182$. Объемные концентрации компонент в системе: твердой $m_1 = m_s/m' = 0.4357$; жидкой $m_3 = \psi/m' = 0.4477$ и газовой $m_2 = \psi_{sat}/m' - m_3 = 1 - m_1 - m_3 = 0.1166$. По формуле (2) находим геометрический параметр твердого скелета $c = 0.4572$. Перед определением геометрических параметров жидкой компоненты необходимо принять значение угла смачивания. С учетом данных работ [13,17] угол смачивания был принят равным $\theta = 45^\circ$. В таком случае найденное по формуле (4) граничное влагосодержание пор $\psi_p' = 0.4055$ не превышало фактического влагосодержания пор $\psi_p = m_3(1 - m_1) = 0.7934$. Это означает, что жидкость в поровом пространстве распределена непрерывно и её геометрические параметры c_x и c_n определяются с использованием формул (1), (3) и (5), а расчет теплопроводности системы следует выполнять по формулам (6) и (7). Вычисления дали значения $c_x = 0.8204$ и $c_n = 0.7844$. После реализации описанной ранее итеративной процедуры установлена теплопроводность твердого скелета $\lambda_1 = 0.84$ Вт/(м · К). Теплопроводность газовой компоненты определена с использованием формул (11) - (16) и равна $\lambda_2 = 0.0269$ Вт/(м · К). Теплопроводность воды, вычисленная по формуле (16) равна $\lambda_3 = 0.597$ Вт/(м · К). По формуле (6) определена теплопроводность системы при адиабатическом делении элементарной ячейки $\lambda_a' = 0.4845$, а по формуле (7) при изотермическом дроблении элементарной ячейки $\lambda_{и}' = 0.6109$ Вт/(м · К). Их среднее принято в качестве оценки эффективной теплопроводности трехкомпонентной системы $\lambda' = 0.5(0.4845 + 0.6109) = 0.5477$ Вт/(м · К).

Отметим, что если фактическое влагосодержание пор ψ_p не превышает граничного ψ_p' , то жидкость распределена в пористом материале в виде замкнутых включений. Тогда определение теплопроводности системы можно выполнять по формулам работы [12] или по формулам (6) и (7), приняв $c_n = c$ и определив c_x по формуле (1), в которой вместо объемной концентрации жидкости в узле решетки ψ_k использовать фактическое влагосодержание $m_3 = \psi/m'$.

На втором этапе выполняется расчет бинарной системы, у которой объемная концентрация первой компоненты $m_1 = m' = 0.5182$ и теплопроводность $\lambda_1 = \lambda' = 0.5477$ Вт/(м · К). Объемная концентрация второй компоненты (газ) $m_2 = 1 - m_1 = 0.4812$ с теплопроводностью паровоздушной смеси в замкнутых

крупных порах $\lambda_2 = 0.0962$ Вт/(м · К), вычисленной по формулам (11) - (15) с учетом того, что коэффициент сопротивления диффузии пара в замкнутых порах $\mu = 1$. По формулам (18) и (19) определена теплопроводность бинарной системы при делении элементарной ячейки адиабатическими плоскостями $\lambda_a = 0.2833$ Вт/(м · К) и изотермическими плоскостями $\lambda_{и} = 0.3037$ Вт/(м · К). Получена оценка эффективной теплопроводности материала $\lambda = 0.5(\lambda_a + \lambda_{и}) = 0.2935$ Вт/(м · К) и среднего опытного значения $\lambda_h = 0.278$ Вт/(м · К). Расчетное значение λ превышает опытное λ_h на 5.57%.

Расчет теплопроводности трехкомпонентной системы можно выполнить с использованием двух существующих методов, в которых не учитывается двумодальное распределение пор по размерам. В первом методе трехкомпонентная система сводится к двум последовательным бинарным системам, а во втором методе одновременно учитываются все компоненты, недостатки первого и преимущества второго метода рассмотрены в работе [11]. Поэтому для сравнения расчет теплопроводности тех же образцов выполнен по второму существующему методу. В этом случае имеем следующие значения объемных концентраций компонент: твердой $m_1 = m_s = 0.2258$, жидкой $m_3 = \psi = 0.232$ и газообразной $m_2 = 1 - m_1 - m_3 = 0.5422$. Значения теплопроводности твердого скелета $\lambda_1 = 0.84$ Вт/(м · К) и воды $\lambda_3 = 0.597$ Вт/(м · К) остались прежними, а теплопроводность паровоздушной смеси была определена с использованием формул (11) - (16) и равна $\lambda_2 = 0.0358$ Вт/(м · К). При значении $m_1 = 0.2257$ по формуле (2) найден геометрический параметра твердого скелета $c = 0.3075$. Граничное влагосодержание пор, вычисленное по формуле (4) равнялось $\psi_p' = 0.3571$ и превышало фактическое влагосодержание $\psi_p = \psi/P = \psi/(1 - m_1) = 0.2997$. Из этого соотношения следует, что жидкость распределена в порах материала в виде изолированных включений. В таком случае при расчете эффективной теплопроводности материала можно использовать формулы (6) и (7) или формулы работы [11], полученные специально для изолированных включений жидкости.

При использовании зависимостей (6) и (7) в случае замкнутых включений жидкости принято $c_n = c = 0.3075$ и из решения кубического уравнения (1) при $\psi_k = \psi = 0.232$ найдено $d = 0.4163$ и $c_x = c + d = 0.7238$. Затем определены значения теплопроводности трехкомпонентной системы при дроблении элементарной ячейки адиабатическими $\lambda_a = 0.1476$ Вт/(м · К) и изотермическими $\lambda_{и} = 0.2377$ Вт/(м · К) плоскостями. Их среднее значение принято в качестве оценки эффективной теплопроводности материала $\hat{\lambda} = 0.5(\lambda_a + \lambda_{и}) = 0.1926$ Вт/(м · К). Эта оценка оказалась ниже опытного значения $\lambda_h = 0.278$ Вт/(м · К) на 30.7%.

По рассмотренной схеме были выполнены расчеты теплопроводности всех четырех серий влажных образцов газосиликатного материала, результаты которых вместе с опытными данными представлены в таблице 2. Из анализа этой таблицы следует, что результаты расчета теплопроводности по предлагаемому методу λ достаточно точно предсказывают опытные значения λ_h . Отклонения расчетных значений от опытных Δ , найденные из соотношения $\Delta = (\lambda - \lambda_h) \cdot 100\% / \lambda_h$, варьировались в пределах от -7.29 до + 5.75% при их среднем $\bar{\Delta} = -0.71\%$. В то время как существующий метод расчета, который не учиты-

вает двумодального распределения пор по размерам, дает индивидуальные отклонения в пределах от -30.72 до -21.98% при среднем $\bar{\Delta} = -26\%$. Это означает, что значения теплопроводности $\hat{\lambda}$, вычисленные по известному методу, существенно недопредсказывают опытные данные λ_h . Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о том, что предлагаемый метод целесообразно использовать для определения теплопроводности влажных газосиликатных материалов вплоть до их водонасыщения при свободном капиллярном впитывании.

Таблица 2. Значения теплопроводности образцов влажного газосиликатного материала, определенные экспериментальным путем λ_h и путем расчета по предлагаемому λ и существующему $\hat{\lambda}$ методам в зависимости от плотности ρ и влагосодержания ψ образцов в четырех сериях.

№ серии	ρ , кг/м ³	ψ	λ_h , Вт/(м·К)	λ , Вт/(м·К)	$\hat{\lambda}$, Вт/(м·К)
1	447	0.1030	0.2100	0.2000	0.1587
	447	0.2320	0.2780	0.2935	0.1926
2	530	0.1323	0.2540	0.2362	0.1923
	530	0.2413	0.3035	0.3235	0.2202
3	577	0.1420	0.2675	0.2480	0.2044
	577	0.2604	0.3358	0.3450	0.2389
4	614	0.1520	0.2810	0.2606	0.2060
	614	0.3165	0.3771	0.3988	0.2942

4. Заключение

Предложен метод расчета эффективной теплопроводности газосиликатных материалов, имеющих двумодальное распределение пор по размерам. Для учета этой особенности расчет следует выполнять в два этапа. Вначале рассматривается трехкомпонентная система, состоящая из твердого скелета, в мелких (капиллярных) порах которого содержится газ и жидкость. Объемная концентрация мелкопористой части системы определяется по водопоглощению при погружении опытных образцов в воду. Затем учитывается бинарная системы, состоящая из упомянутой трехкомпонентной системы, эффективная теплопроводность которой определяется по формулам, полученным с помощью теории обобщенной проводимости. Теплопроводность бинарной системы вычисляется по известным формулам. В лабораторных условиях измерена теплопроводность промышленных газосиликатных образцов, влагосодержание которых возросло вплоть до свободного капиллярного водонасыщения. Исходя из условий эксперимента выполнен расчет теплопроводности образцов по предлагаемому и существующему методам. Установлено, что результаты расчета теплопроводности по предлагаемому методу практически совпадают с опытными значениями, а по существующему методу они оказались значительно меньше опытных данных.

References

Список цитированных источников

1. Alsabry, A. Evaluation of the influence of wind-driven on moisture in cellular concrete wall boards / A. Alsabry [et al.] // Int. J. of Applied Mechanics and Engineering. - 2017. - vol.22. - No 3. - pp. 509-519

2. Blocken, B.J.E. A review of wind-driven rain research in building science / Blocken B.J.E., Carmeliet J.E. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. - 2004. - no 92(13). - pp 1079-1130

3. Blocken, B.J.E. On the validity of the cosine projection in wind driven rain calculations on buildings / Blocken B.J.E., Carmeliet J.E. // Building and Environment. - 2006. - no 41(9). - pp 1182-1189.

4. Nikitsin, V.I. On taking wind-driven rain and capillary characteristics of materials into account while calculating dampness of shielling structures for buildings / V.I., Nikitsin B. Backiel-Brzozowska // Modern materials. - installations and construction technologies.. Ed. by S. Fic. Wyd. PSW JP II. Biala Podlaska. - 2013. - P 36-46.

5. Gawin D. Modelowanie sprzężonych zjawisk ciepło-wilgotnościowych w materiałach i elementach budowlanych / D., Gawin // - Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2000.

6. Małolepszy, J. Możliwości wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego odmiany 300 / J. Małolepszy, W. Pichór // Konf. Naukowo-Techniczna "Technologiczne. - organizacyjne i ekonomiczne aspekty rozwoju budownictwa". - Olsztyn - Lańsk 2002. - s. 297-305.

7. Низовцев, М.И. Расчетно-экспериментальные исследования энергоэффективных элементов ограждающих конструкций и климатического оборудования зданий / М.И., Низовцев // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора техн. наук. Тюмень. - 2009. - 39с.

8. Moisture and heat transport and storage characteristics of two commercial autoclaved aerated concretes / M. Jerman [et al.] // Cement Wapno Beton. 2011. - № 1. - P 18-29.

9. В.И., Никитин Зависимости для расчета теплопроводности влажных капиллярно-пористых стеновых материалов / Никитин В. И., Никитин С. К. // Вестник Брестского государственного технического университета. - 2022. - № 2, Серия: Строительство - С. 32-40.

10. Дульнев Г. Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г. Н., Дульнев, В. В. Новиков // Энергоатомиздат. - 1991.- 248 с.

11. Alsabry, A. Dependencies for Determining the Thermal Conductivity of Moist Capillary-Porous Materials / A. Alsabry, B. Backiel-Brzozowska, V. I. Nikitsin // Energies 2020. - 13. - 3211.

12. 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 Transf. 2013. - 56. - P 30-34.

13. A Model of Moist Polymer Foam and a Scheme for the Calculation of It's Thermal Conductivity / V. I. Nikitsin [et al.] // Energies 2020. - 13. - 520.

14. 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.

15. 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.

16. 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

17. 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.