

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 691.175.5.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВЛАЖНЫХ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*д-р техн. наук, проф. В.И. НИКИТИН**(Государственная высшая школа им. Я. Павла II в Бялой Подляске, Польша);**канд. техн. наук, доц. В.А. КОФАНОВ**(Брестский государственный технический университет);**канд. техн. наук Б. БАЦКЕЛЬ-БЖОЗОВСКА**(Белостокский политехнический институт, Польша)*

Представлена геометрическая модель структуры пенопласта с учетом влагосодержания и смачивания поверхности пор. Выполнено математическое описание процесса переноса тепла в трехкомпонентной модельной структуре влажного пенопласта с учетом диффузии пара в поровом пространстве. Предложен метод расчета эффективной теплопроводности влагосодержащих высокопористых газонаполненных полимерных материалов, в котором рассматривается модель влажного материала с твердым скелетом, более точно учитывается сопротивление пористой среды диффузии пара, определены условия перехода от частичного смачивания поверхности пор жидкостью к полному без необходимости определения эмпирических коэффициентов. Проведен вычислительный эксперимент, результаты которого показывают взаимное влияние влагосодержания, пористости и концентрации полимера на эффективную теплопроводность материала при заданной температуре.

Ключевые слова: *структура материала, влажный пенопласт, эффективная теплопроводность, диффузия пара, пористость, влагосодержание, математическая модель.*

Введение. Газонаполненные полимерные материалы (пенопласты) широко применяются в строительстве и других отраслях промышленности в качестве эффективной тепловой изоляции зданий и сооружений, в процессе эксплуатации которых происходит циклическое изменение температуры и влажности окружающей среды, вызывающее гигротермическую деградацию полимерной основы теплоизоляционного слоя. При этом влагосодержание материала может повышаться до значений, значительно превышающих максимальное гигроскопическое, что приводит к снижению его теплоизоляционных свойств.

Важнейшей характеристикой газонаполненных полимерных материалов, определяющей их теплозащитные свойства, является эффективный коэффициент теплопроводности λ , значение которого можно определить экспериментально или путем расчетов на основе математических моделей, описывающих структуру пористого материала и протекающие в нем совместные процессы тепло- и влагопереноса.

Из анализа работ [1–4] следует, что надежная экспериментальная оценка теплопроводности влажных пористых материалов весьма затруднительна, так как измеренная теплопроводность одного и того же материала с одним и тем же средним влагосодержанием может значительно отличаться (иногда в несколько раз). В первую очередь, это можно объяснить характером смачивания поверхности пор жидкостью (частичное или полное), характером распределения влаги в объеме испытываемого образца (равномерное или неравномерное), методом измерения (стационарный или нестационарный) и т.д. На основе результатов экспериментальных и теоретических исследований в работе [1] делается вывод, согласно которому все попытки учесть влияние процессов влагообмена в теплоизоляционных конструкциях на их теплозащитные свойства путем применения в расчетах эффективной теплопроводности, определяемой путем измерения теплопроводности влажных материалов стационарными и нестационарными методами, не могут дать удовлетворительных результатов. Поэтому для определения теплопроводности влажных материалов необходимо использовать и развивать инженерные методы расчета, основанные на математическом моделировании совместных процессов тепло- и влагопереноса.

Для расчета теплопроводности сухих теплоизоляционных материалов существуют многочисленные зависимости, полученные различными методами за последние более чем сто лет. В работах [5; 6] рассмотрены и проанализированы многие из них и выбраны лучшие с точки зрения точности предсказания опытных данных. Этого нельзя сказать в отношении немногочисленных публикаций [1; 2; 7], в которых для расчета эффективной теплопроводности влажного материала используется метод Кришера или его усовершенствования. Эти методы содержат эмпирические коэффициенты и при их использовании получают существенно разные результаты. При оценке влияния диффузии пара на перенос тепла не учитывается или недостаточно точно учитывается сопротивление пористой среды диффузии пара.

Только в одной работе [1] рассматриваются влажные пенопласты и только в работе [2] учитывается характер смачивания поверхности пор жидкостью (частичное или полное). Отметим, что в открытой ячеистой структуре переход от частичного смачивания поверхности пор жидкостью к полному смачиванию сопровождается скачкообразным повышением эффективной теплопроводности материала. В данной работе предлагается метод расчета эффективной теплопроводности влагосодержащих высокопористых ($P > 0,85$) газонаполненных полимерных материалов, в котором рассматривается модель влажного материала с твердым скелетом, представленная в [2], более точно учитывается сопротивление пористой среды диффузии пара, определены условия перехода от частичного смачивания поверхности пор жидкостью к полному без необходимости определения эмпирических коэффициентов.

Модель структуры влажного пенопласта и расчетные зависимости

Из результатов визуализации структур газонаполненных полимеров различных видов, представленных в ряде работ [1; 8–10], следует, что жесткий полимерный каркас состоит из многогранных ячеек открытого и закрытого типа, грани которых имеют, в основном, четырех-, пяти- и шестиугольную форму. Основная доля полимера сосредоточена преимущественно в прямолинейных стержнях, имеющих почти постоянное поперечное сечение с незначительными утолщениями к узлам, которые образованы в результате слияния, как правило, четырех стержней.

В зависимости от вида полимера и технологии его вспенивания содержание открытых ячеек изменяется в широком диапазоне и может достигать 98% [1]. В результате гигротермической деградации полимерной основы эксплуатируемых пеноматериалов происходит сокращение количества закрытых ячеек [6]. Это позволяет принять, что структура эксплуатируемых пенопластов имеет преимущественно сообщающиеся ячейки и ее следует отнести к структурам с взаимопроницающими геометрически равноправными компонентами.

Из анализа результатов работ [11; 12], полученных путем численного моделирования, следует, что для сухих высокопористых полимерных пен ($P > 0,9$) форма ячеек и поперечного сечения стержней имеют слабое влияние на теплопроводность этих материалов. При этом рассматривались ячейки регулярной структуры в виде куба, додекаэдра (12 пятиугольных граней) и тетракайдекаэдра (многогранник Кельвина, имеющий 6 квадратных и 8 шестиугольных граней). Форма узлов (квадрат, шар и др.), распределение объема полимера между стержнями и узлами реальных ячеек также не оказывают существенного влияния на теплопроводность высокопористых пенопластов. Таким образом, при расчетах теплопроводности сухих высокопористых пенопластов реальная структура материала, который считается изотропным, может быть заменена моделью с упорядоченной структурой, состоящей из одинаковых элементарных ячеек наиболее простой кубической формы.

Симметрия элементарной ячейки в двух взаимноперпендикулярных направлениях позволяет проводить описание моделируемого процесса в $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$ ее части. На рисунке 1 изображена восьмая часть элементарной ячейки (кусочно-составного тела).

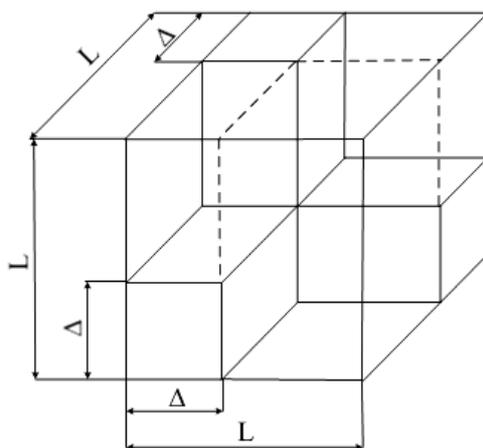


Рисунок 1. – Восьмая часть элементарной ячейки

При оценке характера распределения жидкой влаги в элементарной ячейке необходимо учитывать влагосодержание материала ψ и краевого угол смачивания θ , образованный на границе твердого тела, жидкости и газа. Из анализа результатов многочисленных экспериментальных исследований, выполненных в лабораторных и натуральных условиях и частично представленных в работах [1; 13], следует, что при постоянном контакте со средой с изменяющейся влажностью и температурой объемное влагосодержание полиуретановых и фенольных пенопластов может составлять $\psi = 0,06 \dots 0,07 \text{ м}^3/\text{м}^3$, а в отдельных случаях (изоляция на грунте, низкотемпературная изоляция) достигать значения $\psi = 0,15 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Чтобы получить представление о значении краевого угла смачивания θ , был выполнен эксперимент с использованием метода крупной капли жидкости ($2...3 \text{ см}^3$), смачивающей горизонтальную поверхность твердого полимера [14]. После пяти независимых измерений угла смачивания водой горизонтальной поверхности твердого полиуретана при температуре 20°C оказалось, что измеряемая случайная величина характеризуется средним арифметическим значением $\bar{\theta} = 56^\circ$ и выборочным стандартным отклонением $s = 3,2^\circ$. Очевидно, что для другого типа полимера и других условий опыта значения $\bar{\theta}$ и s будут отличаться.

Достаточно просто представить характер распределения жидкости в узле элементарной ячейки. В качестве примера на рисунке 2 приведена восьмая часть элементарной ячейки, содержащей изолированное включение жидкости при угле смачивания $\theta = 45^\circ$. С увеличением влагосодержания размер x (рисунок 2) будет возрастать и при $x = L - \Delta$ поверхность стержней ячейки будет полностью смочена жидкостью. Переход от частичного смачивания поверхности пор жидкостью к полному смачиванию сопровождается скачкообразным возрастанием теплопроводности материала. В связи с этим важно знать граничное влагосодержание пор ψ'_p , при котором происходит данный переход.

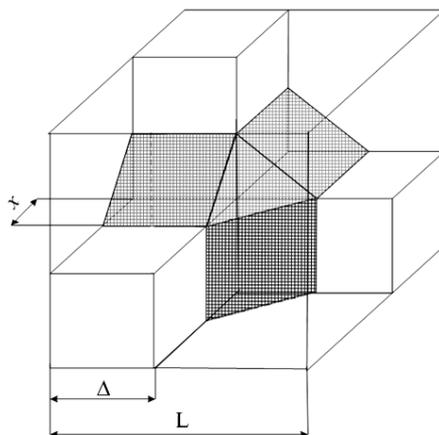


Рисунок 2. – Характер распределения изолированного включения жидкости в элементарной ячейке при угле смачивания $\theta = 45^\circ$

Объемное влагосодержание пор ψ_p связано с объемом жидкости V_w и пор V_p или с объемным влагосодержанием материала ψ и его пористостью P соотношением $\psi_p = \psi / P$.

Из рисунка 3 следует, что $V_w = 3 \cdot x^2 \cdot \Delta / 2 + x^3 / 6$.

Объем пор в сухом состоянии $V_p = (L - \Delta)^2 \cdot L + (L - \Delta)^2 \cdot \Delta \cdot 2 = L^3 - 3 \cdot \Delta^2 \cdot L + 2 \cdot \Delta^3$.

Приняв $x = L - \Delta$, после простых преобразований получим объемное граничное влагосодержание пор при угле смачивания $\theta = 45^\circ$:

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

где $c = \Delta / L$.

Аналогичным образом при угле смачивания $\theta = 90^\circ$ приходим к следующей зависимости:

$$\psi'_p = \frac{\pi \cdot (1 + 3,5 \cdot c)}{6 \cdot (1 + 2 \cdot c)}. \quad (2)$$

При угле смачивания $\theta = 0^\circ$ имеем

$$\psi'_p = \frac{(4 - \pi) \cdot (1 + 14 \cdot c)}{20 \cdot (1 + 2 \cdot c)}. \quad (3)$$

Относительный размер стержней c вычисляется по формуле из [14]:

$$c = 0,5 + \sin \left[\frac{\arcsin(2 \cdot m_i - 1)}{3} \right], \quad (4)$$

где m_i – концентрация i -той компоненты, для которой определяется величина c (в данном случае концентрация полимера).

С помощью формул (1), (2) и (3) можно установить зависимость граничного влагосодержания пор ψ'_p от угла смачивания θ при различных значениях относительного размера стержней $c = \Delta/L$. Иллюстрация указанной зависимости представлена на рисунке 3. Из анализа этого рисунка следует, что для высокопористых пенопластов полное смачивание возможно лишь при очень малых углах смачивания и высоком влагосодержании. Поэтому в сомнительных случаях нужно выполнять проверочные расчеты.

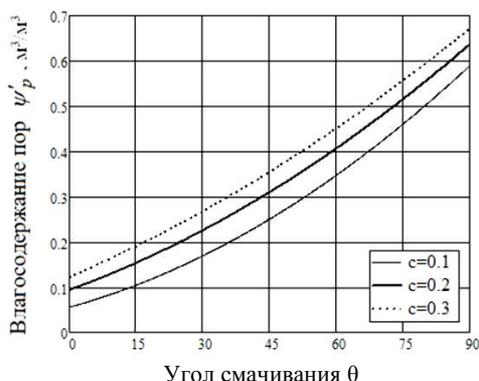


Рисунок 3. – Расчетная зависимость граничного влагосодержания пор ψ'_p от угла смачивания θ при различных относительных размерах стержней элементарной ячейки c

Очевидно, что коэффициент теплопроводности влажного пенопласта зависит от теплопроводности полимерного скелета и внутрипорового вещества, которое во влагосодержащих материалах состоит из парогазовой смеси и воды. При частичном смачивании элементарная ячейка (геометрическая модель) этой трехкомпонентной системы показана на рисунке 4. В соответствии с подходом Релея [2] эта ячейка разбита на части бесконечно тонкими плоскостями, параллельными потоку тепла G и непроницаемыми для линий тока. В результате объем элементарной ячейки оказался разбитым на 14 частей в виде прямоугольных параллелепипедов, которые имеют номера от 1 до 9. Геометрически одинаковые части (элементы) имеют одинаковые номера. Объем первой компоненты (полимера) s складывается из объема пяти элементов под номерами 1, 2 и 8. Объем второй компоненты (парогазовая смесь) складывается из шести частей под номерами 3, 4, 6 и 9, имеющих теплопроводность λ_2 . Третья компонента (жидкость) состоит из трех частей под номерами 5 и 7 с теплопроводностью λ_3 .

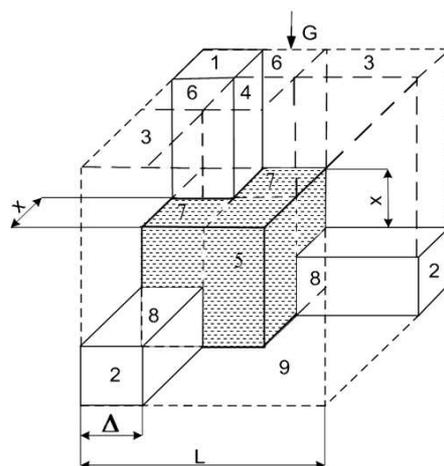


Рисунок 4. – Элементарная ячейка структуры трехкомпонентной системы

Сопротивления элементов потоку тепла вычисляется по простой формуле

$$R_i = \frac{l_i}{\lambda_i \cdot S_i}, \quad (5)$$

где l_i – длина линии тока i -го элемента; S_i – площадь поперечного сечения i -го элемента; λ_i – теплопроводность i -го элемента.

Согласно формуле (5) тепловые сопротивления элементов с номерами от 1 до 9 равны:

$$R_1 = \frac{L}{\lambda_1 \cdot \Delta^2}; R_2 = \frac{\Delta}{\lambda_1 \cdot \Delta \cdot (L - \Delta - x)}; R_3 = \frac{L - \Delta}{\lambda_2 \cdot \Delta \cdot (L - \Delta - x)}; R_4 = \frac{L - \Delta - x}{\lambda_2 \cdot x^2};$$

$$R_5 = \frac{\Delta + x}{\lambda_3 \cdot x^2}; R_6 = \frac{L - \Delta - x}{\lambda_2 \cdot \Delta \cdot x}; R_7 = \frac{x}{\lambda_3 \cdot \Delta \cdot x}; R_8 = \frac{\Delta}{\lambda_1 \cdot \Delta \cdot x}; R_9 = \frac{L}{\lambda_2 \cdot [(L - \Delta)^2 - x^2]}.$$
 (6)

Значение x связано с объемом жидкости $V_{жс}$, который, как видно из рисунка 4, равен $V_{жс} = x^3 + 3 \cdot \Delta \cdot x^2$. Разделив левую и правую части этого соотношения на объем элементарной ячейки L^3 , получим кубическое уравнение вида

$$\psi = d^3 + 3 \cdot c \cdot d^2,$$
 (7)

решая которое определяем физически оправданный корень $d = x/L$ при $c = \Delta/L$.

Схема соединения сопротивлений элементов элементарной ячейки приведена на рисунке 5.

Из этой схемы определяется общее сопротивление элементарной ячейки R :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2 + R_3} + \frac{2}{R_6 + R_7 + R_8} + \frac{1}{R_4 + R_5} + \frac{1}{R_9}.$$
 (8)

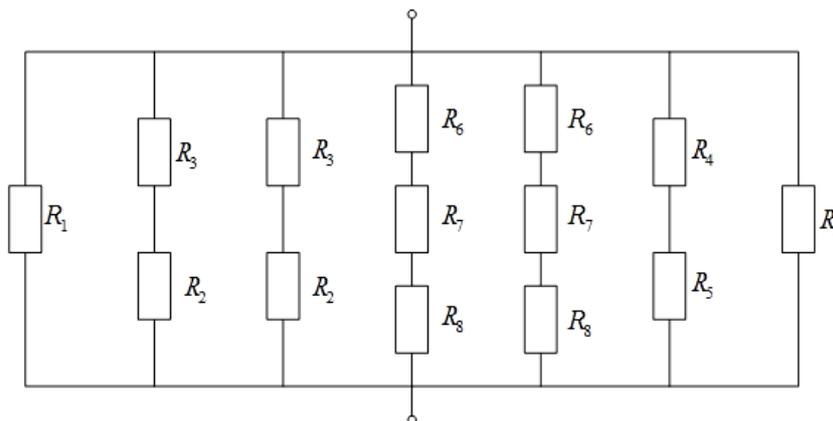


Рисунок 5. – Схема соединения сопротивлений элементов элементарной ячейки

Общее сопротивление элементарной ячейки объема L^3 , заполненной однородным веществом с эффективной теплопроводностью λ , может быть представлено следующим образом:

$$R = \frac{L}{\lambda \cdot L^2} = \frac{1}{\lambda \cdot L}.$$
 (9)

Переписав формулу (8) с учетом (6) и (9), после несложных преобразований получим довольно громоздкую зависимость для определения эффективной теплопроводности трехкомпонентной системы:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = c^2 + \frac{2 \cdot v_1 \cdot c \cdot (1 - c - d)}{v_1 \cdot c + 1 - c} + \frac{2 \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot c \cdot d}{v_2 \cdot (1 - c - d) + v_1 \cdot d + v_1 \cdot v_2 \cdot c} +$$

$$+ \frac{v_1 \cdot v_2 \cdot d^2}{v_2 \cdot (1 - c - d) + v_1 \cdot (c + d)} + v_1 \cdot [(1 - c)^2 - d^2],$$
 (10)

где $v_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$, $v_2 = \frac{\lambda_3}{\lambda_1}$, $c = \frac{\Delta}{L}$, $d = \frac{x}{L}$.

Эффективную теплопроводность трехкомпонентной системы можно определить также методом последовательного сведения многокомпонентной системы к бинарной, теплопроводность которой вычисляется по известным формулам [2]. Такой подход возможен лишь при условии, что его использование приводит к результату, получаемому по формуле (10). После численного эксперимента оказалось, что условие равенства результатов выполняется, если последовательно рассматриваются две бинарные

системы. На первом этапе определяется эффективная теплопроводность внутрипорового вещества, содержащего парогазовую смесь (индекс компоненты 2) и жидкость (индекс 3). На втором этапе определяется эффективная теплопроводность всего материала (комбинация индексов 23 и 1). При остальных двух комбинациях индексов компонентов (12 и 3; 13 и 2) получаются результаты, существенно отличающиеся от результатов, определяемых по формуле (10).

Таким образом, имеется возможность определить эффективную теплопроводность рассматриваемой трехкомпонентной системы с использованием известных простых формул, полученных для бинарных систем. Для этого вначале определялась теплопроводность парогазовой смеси λ_{va} путем суммирования теплопроводности газа (воздуха) λ_a и теплопроводности за счет диффузии водяного пара в поровом пространстве λ_v . Затем вычислялась эффективная теплопроводность внутрипорового вещества λ_{subp} , состоящего из парогазовой смеси и жидкости с известными концентрациями и теплопроводностями.

Если поверхность пор (ячеек) смачивается жидкостью частично, то теплопроводность внутрипорового вещества λ_{subp} определяется с использованием зависимости для структуры с замкнутыми включениями [2]:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \frac{v - (v-1) \cdot (1 - m_2^{2/3}) \cdot m_2^{1/3}}{v - (v-1) \cdot m_2^{1/3}}, \quad (11)$$

где $\lambda = \lambda_{subp}$; $\lambda_1 = \lambda_{va}$; $v = \lambda_2/\lambda_1$; λ_2 – теплопроводность жидкости; m_2 – концентрация включений (жидкости).

Если поверхность пор смачивается полностью, то для определения λ_{subp} используется зависимость для структуры с взаимопроникающими компонентами [2]:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \left[c^2 + v \cdot (1-c)^2 + 2 \cdot v \cdot c \cdot (1-c) \cdot (v \cdot c + 1 - c)^{-1} \right], \quad (12)$$

где $\lambda = \lambda_{subp}$; $\lambda_1 = \lambda_{va}$; $v = \lambda_2/\lambda_1$.

И наконец, по формуле (12) при теплопроводности полимера λ_1 и теплопроводности внутрипорового вещества $\lambda_2 = \lambda_{subp}$, а также их соотношении $v = \lambda_2/\lambda_1$ вычисляется эффективная теплопроводность всего материала λ .

Теплопроводность пара λ_v , вызванная его диффузионным переносом в поровом пространстве, определяется по формуле [2], базирующейся на зависимости Кришера [7]:

$$\lambda_v = \frac{D}{\mu} \cdot \frac{M}{R \cdot T} \cdot \frac{p_{va}}{p_{va} - p_v} \cdot \frac{dp_v}{dt} \cdot q_t. \quad (13)$$

Здесь D – коэффициент диффузии водяного пара в неподвижном воздухе, $\text{м}^2/\text{с}$; μ – коэффициент сопротивления диффузии пара через поровое пространство; M – молекулярная масса пара, $\text{кг}/\text{моль}$; R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; T – температура пара, К ; p_{va} – суммарное давление пара и воздуха, Па ; p_v – парциальное давление насыщенного пара, Па ; t – температура, $^\circ\text{C}$; q_t – удельная теплота парообразования при температуре t , $\text{Дж}/\text{кг}$.

При определении коэффициента диффузии пара D воспользуемся широко известной формулой Схимера (R. Schirmer) [7; 15]:

$$D = \frac{2,305 \cdot 10^{-5} \cdot p_0}{p_{va}} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81}, \quad (14)$$

где $p_0 = 101323 \text{ Па}$.

Коэффициент сопротивления диффузии пара целесообразно определять с помощью зависимости, полученной на основе работ [16; 17]:

$$\mu = \frac{\tau^2}{P - \Psi}, \quad (15)$$

где τ – коэффициент извилистости, который согласно [14] равен

$$\tau = \frac{P - \Psi}{c^2}. \quad (16)$$

После подстановки формулы (16) в (15) получаем:

$$\mu = \frac{P - \Psi}{c^4}. \quad (17)$$

Производную dp_v/dt можно определить с помощью справочных данных или по формуле из [7]:

$$\frac{dp_v}{dt} = \frac{2,44314 \cdot 10^6}{(234,175 + t)^2} \cdot \exp\left(\frac{17,08085 \cdot t}{234,175 + t}\right). \quad (18)$$

Температурная зависимость удельной теплоты парообразования имеет вид:

$$q_t = (2,5 - 0,0024 \cdot t) \cdot 10^6. \quad (19)$$

Теплопроводность воды можно определить как

$$\lambda_w = 0,551 + 0,256 \cdot 10^{-2} \cdot t - 0,124 \cdot 10^{-4} \cdot t^2. \quad (20)$$

Для определения теплопроводности воздуха воспользуемся зависимостью [1]:

$$\lambda_a = 0,0257 \cdot [1 + 0,003 \cdot (t - 20)]. \quad (21)$$

В температурном диапазоне от 0 до 100 °С теплопроводность полимерного скелета изменяется незначительно [1] и может быть принята постоянной.

Отметим, что сорбционная влажность материала отдельно не учитывалась и включалась в общее влагосодержание ψ , так как максимальная гигроскопическая влажность ψ_h большинства пенопластов составляет лишь 0,001–0,006 м³/м³ и повышает теплопроводность внутрипорового вещества λ_{subp} не более чем на 1,5%.

Вычислительный эксперимент и его результаты

Вычислительный эксперимент выполнен с целью оценки влияния влагосодержания ψ и пористости P пенопласта на его эффективную теплопроводность λ при заданной температуре. Температура пенопласта t принята равной 20 °С. При этом теплопроводность полимера принята равной 0,25 Вт/(м·К), что типично для полиуретанов. Теплопроводность воды составляла 0,597 Вт/(м·К), воздуха – 0,0257 Вт/(м·К). Удельная теплота парообразования при $t = 20$ °С равнялась $q = 2,452 \cdot 10^6$ Дж/кг. Остальные необходимые для выполнения вычислительного эксперимента параметры определялись с помощью приведенных выше формул. Влагосодержание варьировалось от 0,01 до 0,20 м³/м³, пористость P – от 0,85 до 0,99. В таком случае активная пористость $P - \psi$ изменялась от 0,98 до 0,65, а суммарная объемная концентрация твердой и жидкой компонент $1 - (P - \psi)$ изменялась от 0,02 до 0,35. Для сравнения был выполнен расчет при отсутствии жидкости ($\psi = 0$), который позволил выявить влияние диффузии пара и влагосодержания на теплопроводность высокопористых материалов.

Результаты вычислительного эксперимента представлены на рисунке 6 совместно с опытными данными, взятыми из работы [1] и отмеченными треугольниками. Эти результаты отражают взаимное влияние влагосодержания ψ , пористости P и диффузии пара внутри эффективной пористости $P - \psi$ на эффективную теплопроводность материала λ .

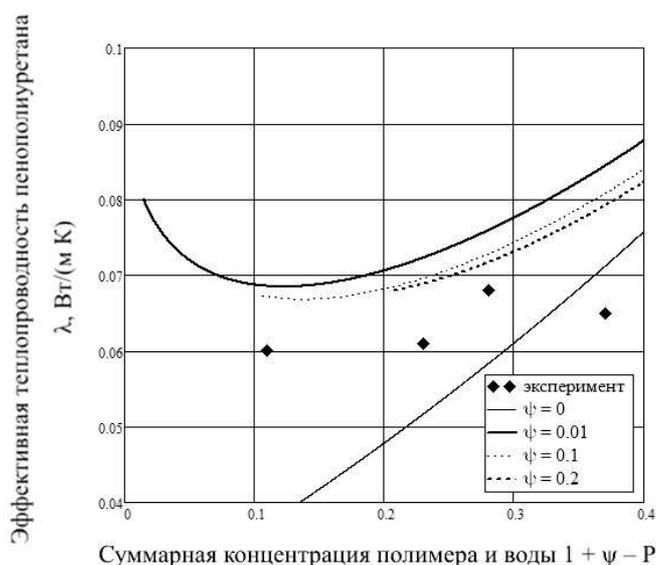


Рисунок 6. – Зависимость эффективной теплопроводности пенополиуретана λ от суммарной концентрации полимера и воды ($1 + \psi - P$)

Из рисунка 6 видно, что все зависимости (кривые), полученные при фиксированных значениях реального влагосодержания ($\psi \leq 0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$), характеризуются криволинейностью. Эта криволинейность связана с тем, что с увеличением доли твердого полимера и жидкости возрастает теплопроводность материала и уменьшается его эффективная пористость и, следовательно, уменьшается теплопроводность материала за счет диффузии пара. Заметим, что все эти кривые могут быть с достаточной точностью аппроксимированы одной зависимостью, которая качественно совпадает с эмпирическими зависимостями эффективной теплопроводности различных сухих теплоизоляционных материалов от их плотности, полученными различными авторами [1; 18].

Предлагаемый метод расчета неплохо (в пределах двух стандартных отклонений) предсказывает опытные данные, отображенные на рисунке 6 и обозначенные треугольниками. Эти опытные данные получены для фенольного пенопласта. Как известно, теплопроводность твердого фенольного полимера меньше полиуретанового и составляет примерно $0,19 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Если в вычислениях использовать это значение, то расчетные кривые, приведенные на рисунке 6, опустятся ниже, а опытные данные, обозначенные треугольниками, будут предсказываться более точно.

И наконец, расчетами был подтвержден общеизвестный эффект повышения теплопроводности влажного пенопласта с повышением его средней температуры. При этом влияние диффузионного потока водяного пара на теплопроводность материала существенно возрастает.

Заключение

В ходе проведенного исследования теплопроводности влажных газонаполненных полимерных материалов реализованы следующие задачи:

- обоснована *геометрическая модель* структуры пенопласта с учетом влагосодержания и смачивания поверхности пор;
- *получены зависимости*, позволяющие определить критическое влагосодержание пор, при котором происходит переход от частичного смачивания поверхности пор жидкостью к полному смачиванию и наоборот;
- *выполнено математическое описание* процесса переноса тепла в трехкомпонентной модельной структуре влажного пенопласта с учетом диффузии пара в поровом пространстве;
- *установлено взаимное влияние* влагосодержания ψ , пористости P и концентрации полимера $(1 - P)$ на теплопроводность материала путем вычислительного эксперимента при заданной температуре;
- *выполнено сравнение* результатов расчета с опытными данными, *показано* их достаточно точное совпадение.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Дульнев, Г.Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г.Н. Дульнев, В.В. Новиков. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.
3. Bobociński, A. Wpływ wilgotności ponadsorpcyjnej na przewodność cieplną betonów komorkowych / A. Bobociński // Prace Instytutu Techniki Budowlanej-Kwartalnik. – 2004. – Nr. 4. – S. 3–12.
4. Siwińska, A. Thermal conductivity coefficient of cement-based mortars as air relative humidity function / A. Siwińska, H. Garbalińska // Heat Mass Transfer. – 2011. – Vol. 47. – S. 1077–1087.
5. Collishaw, P.G. An assessment of expressions for the apartment thermal conductivity of cellular materials / P.G. Collishaw, J.R.G. Evans // Journal of Materials Science. – 1994. – Vol. 29. – P. 486–498.
6. Гурьев, В.В. Учет особенностей ячеистой структуры при анализе расчетной теплопроводности газонаполненных полимерных материалов / В.В. Гурьев, В.И. Никитин, В.А. Кофанов // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 9. – С. 98–104.
7. Ochs, F. Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature / F. Ochs, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen // Heat Mass Transfer. – 2008. – № 51. – P. 539–552.
8. Shi, M. Determination of effective thermal conductivity for polyurethane foam by use of fractal method / M. Shi, X. Li, Y. Chen // Science in China. Series E: Technological Sciences. – 2006. – Vol. 49, № 4. – P. 468–475.
9. Microstructure effects on thermal conductivity of open-cell foams generated from the Lagguare-Voronoi tessellation method / J. Randrianalisoa [et al.] // Heat Mass Transfer. – 2015. – № 98. – P. 277–286.
10. Baillis, D. Effective conductivity of Voronoi's closed and open-cell foams: analytical laws and numerical results / D. Baillis, R. Coquard, S. Cunsolo // Materials Science. – 2017. – № 52. – P. 11146–11167.

11. Gliksman, L.R. Heat transfer in foams / L.R. Gliksman, N.C. Hilyard ; A. Cumingham (eds.) // Low density cellular plastics Springer. – Dordrecht, 1994. – P. 104–152.
12. Coquard, R. Numerical investigation of conductive heat transfer in high porosity foams / R. Coquard, D. Baillis // Acta Materialia. – 2009. – № 57. – P. 5466–5479.
13. Thermal insulation materials made of rigid polyurethane foam (PUR/DIR) : Report № 1 (October) / BING : Federation of European Rigid Polyurethane Foam Associations. – Brussels, 2006. – 33 p.
14. Nikitsin, V.I. Determination of capillary tortuosity coefficient in calculations of moisture transfer in building materials / V.I. Nikitsin, B. Backiel-Brzozowska // Heat Mass Transfer. – 2013. – № 56. – P. 30–34.
15. Sheffer, G.A. A whole range hygric material model : Modelling liquid and vapour transport properties in porous media / G.A. Sheffer // Heat Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53. – P. 286–296.
16. Epstein, N. On tortuosity and the tortuosity factor in flow and diffusion through porous media / N. Epstein // Chemical Engineering Science. – 1989. – Vol. 44, № 3. – P. 777–779.
17. Mendes, M. An improved model for the effective conductivity of open-cell porous foams / M. Mendes, S. Ray, D. Trimis // Heat Mass Transfer. – 2014. – Vol. 75. – P. 224–230.
18. Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials / F. Dominguez-Munoz [et al.] // Building Simulation : materials of XI International IBPSA Conference, Glasgow, 27–30 July 2009. – Glasgow, 2009. – P. 1008–1013.

Послупила 02.12.2019

DETERMINATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF WET GAS-FILLED POLYMERIC MATERIALS

V. NIKITSIN, V. KOFANOV, B. BACKIEL-BRZOZOWSKA

A geometric model of the structure of the foam plastic is presented taking into account the moisture content and wetting of the pore surface. A mathematical description of the heat transfer process in a three-component model structure of wet foam is performed taking into account vapor diffusion in the pore space. A method for calculating the effective thermal conductivity of moisture-containing highly porous gas-filled polymer materials is proposed, which considers a model of a wet material with a solid skeleton, more accurately takes into account the resistance of the porous medium of vapor diffusion, defines the conditions for the transition from partial wetting of the pore surface with liquid to complete without the need for empirical coefficients. A computational experiment was conducted, the results of which show the mutual influence of moisture content, porosity and polymer concentration on the effective thermal conductivity of the material at a given temperature.

Keywords: material structure, wet foam, effective thermal conductivity, vapor diffusion, porosity, moisture content, mathematical model.