

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПЕНОПЛАСТОВ

Никитин В.И., Кофанов В.А., Бацкель-Бжозовска Б.

Введение. Проблема снижения расходов тепловой энергии на отопление жилых, общественных и промышленных зданий, эксплуатируемых в условиях холодного и умеренно холодного климатов, вряд ли когда-нибудь утратит своей актуальности. Сейчас для решения этой проблемы вполне обоснованно использование ограждающих конструкций с применением высокоэффективных пенопластов. Теплозащитные свойства теплоизоляционных конструкций обычно характеризуются коэффициентом эффективной теплопроводности, значение которого можно определить экспериментальным путем или путем расчета на основе математических моделей, описывающих структуру пористого материала и протекающие в нем процессы переноса тепла. В многочисленных публикациях, например [1], отмечается необходимость, как первого, так и второго взаимосвязанных путей исследования с учетом их слабых и сильных сторон. Нами отдается предпочтение второму пути исследования.

При расчетах коэффициента эффективной теплопроводности λ обычно исходят из общепринятого допущения об аддитивности различных механизмов передачи тепла в пористых средах и представляют этот коэффициент в виде суммы коэффициентов кондуктивной λ_q , радиационной λ_p и конвективной λ_k теплопроводности.

Согласно работ [1, 2, 3] и других конвективным переносом тепла в пенопластах в подавляющем большинстве случаев можно пренебречь, так как относительно малые размеры ячеек пористой структуры препятствуют возникновению конвективных токов под действием температурного градиента. Для пенопластов, поры которых заполнены воздухом, максимальный граничный размер ячеек составляет 4 мм [2]. При заполнении пор фреоном эта граница снижается до 1.5 мм. По данным работ [3, 4] для пенополиуретановых и фенольных пенопластов плотностью до 115 кг/м³ максимальный размер ячеек достигает 0.6 мм, что значительно меньше приведенных граничных значений. Это позволяет конвективную составляющую теплопроводности не принимать в расчет.

При расчетах теплоизолирующих свойств пенопластового слоя ограничивающих конструкций зданий лучистый (радиационный) перенос тепла довольно часто также можно не учитывать. По данным работы [3] вклад лучистой составляющей в общий перенос тепла в пенопластах составляет лишь 7-10 %. В случае необходимости аддитивную лучистую составляющую эффективной теплопроводности можно вычислить по формулам, приведенным, например, в обзоре [2] или работах [1, 3, 5], которые в той или иной мере учитывают средний размер ячеек, испускание, поглощение и рассеивание лучистой энергии стенками ячеек пенопластов. Однако после рассмотрения результатов расчетов, представленных в работе [2] и выполненных по различным формулам, мы не можем рекомендовать какую-либо формулу в качестве наилучшей.

Если не учитывать лучистую и конвективную составляющие теплопроводности, то коэффициент эффективной теплопроводности будет определяться только теплопроводностью плотного полимерного скелета и внутрипорового вещества. Для расчета теплопроводности такой двухкомпонентной системы существуют многочисленные зависимости, полученные различными методами за последние более чем сто лет, начиная от Максвелла (J. Maxwell) и Рэля (J.W. Rayleigh) [1, 3, 5]. В обзоре [2] рассмотрены и проанализированы многие из них, имеющие различную сложность, и выбрано несколько лучших с точки зрения точности предсказания опытных данных. Однако в этом обзоре и других публикациях не уделено должного внимания зависимостям, полученным с помощью методов теории обобщенной проводимости в сочетании с геометрическим моделированием структуры [5] и позволяющим с единых позиций анализировать теплопроводность пенопластов. В данной работе выполнен анализ этих зависимостей и проверена их способность прогнозировать опытные данные по сравнению с лучшими формулами, приведенными в работе [2].

Структура пенопластов и ее упрощенная модель

Из результатов визуализации структур газонаполненных полимеров различных видов, представленных в ряде работ [2, 3, 4, 6], следует, что жесткий полимерный каркас состоит из многогранных ячеек (стержни, пленки), грани которых имеют, в основном, четырех- пяти- и шестиугольную форму. Отмечается [3], что основная доля полимера-основы сосредоточена, преимущественно в прямолинейных стрержнях (ребрах), имеющих почти постоянное сечение с незначительными уплотнениями к узлам, которые образованы в результате слияния, как правило, четырех стержней. Шутц и Гликсман (Schuetz i Glikzman) [2] оценили, что 80-90% полимера-основы содержится в стержнях ячеек. Это можно подтвердить приближенными расчетами с использованием опытных данных работы [2] о среднем размере ячеек и толщине пленок (пластинок) пенополиуретанов. Если принять, что полимерный каркас состоит из закрытых кубических ячеек, а поперечное сечение стержней является квадратным, то для пенополиуретана плотностью 50 кг/м^3 , имеющего средний размер ячеек 410 мкм и толщину пленок 0.4 мкм [2], доля полимера в стержнях составит 86%. При этом сторона квадрата поперечного сечения стержней в 60 раз превысит толщину пленок. С увеличением плотности пенополиуретанов возрастает толщина пленок и доля полимера в стержнях ячеек уменьшается.

Поскольку сплошность пленочных граней часто нарушена, то многие ячейки являются открытыми и сообщающимися между собой. В зависимости от вида полимера и технологии его вспенивания содержание открытых ячеек изменяется в очень широком диапазоне. По данным работы [3], структура карбамидных пен, полученных воздушно-механическим способом, образована исключительно открытыми ячейками, содержание которых достигает 98 %. Структура фенольных пенопластов также образована преимущественно открытыми ячейками. Меньшее содержание открытых ячеек наблюдается в пенополиуретанах.

От воздействия окружающей среды происходит деградация полимерной основы пеноматериалов. Применительно к теплоизоляции зданий и сооружений основная деградация полимеров происходит вследствие совместного действия циклически изменяющихся температуры и влажности. Гигротермическая деградация прежде всего пластификацией и набуханием полимерного скелета, образованием микропор и поверхностных микротрещин [7, 8]. Как следует из работ [9, 10], в полимерных материалах возникают микротрещины шириной от 0.01 до 0.1 мкм . Со временем концентрация таких трещин увеличивается и при достижении некоторого критического значения начинают появляться макротрещины, ширина которых (100 мкм и более) значительно превышает толщину пленок и даже стержней ячеек. Причем, расстояние между макротрещинами может приближаться к их ширине. Такие повреждения сокращают количество закрытых ячеек пенопластов, увеличивают их сорбционную способность, ускоряют диффузию влаги и повышают эффективную теплопроводность. Приведенные в работе [10] данные показывают, что пенополиуретановые образцы, влагосодержание которых находится в пределах максимального гигроскопического, после 160 циклов замораживания и оттаивания увеличили свою теплопроводность в среднем в 1.7 раз.

Таким образом, можно сказать, что структура эксплуатируемых пенопластов образована преимущественно открытыми ячейками и ее следует отнести к структурам с взаимопроницающими геометрически равноправными компонентами [5]. Характерной особенностью этой структуры является непрерывная протяженность любой компоненты во всех направлениях. При моделировании такой структуры можно воспользоваться наиболее распространенным методом перехода к элементарной ячейке. В этом случае реальная структура материала с взаимопроницающими элементами, которая считается изотропной, заменяется адекватной ей моделью с упорядоченной структурой, состоящей из одинаковых элементарных ячеек. Для пенопластов кубической формы элементарной ячейкой является вполне обоснованной и наиболее простой. Симметрия элементарной ячейки в двух взаимноперпендикулярных направлениях позволяет проводить описание исследуемого процесса в $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ и $\frac{1}{8}$ ее части.

На рисунке 1 изображена восьмая часть элементарной ячейки простейшей модели структуры с взаимопроницающими компонентами, в которой стержни (брусья) имеют постоянное сечение. С помощью этого рисунка легко установить зависимость между геометрическими параметрами модели и объемной концентрацией компонент.

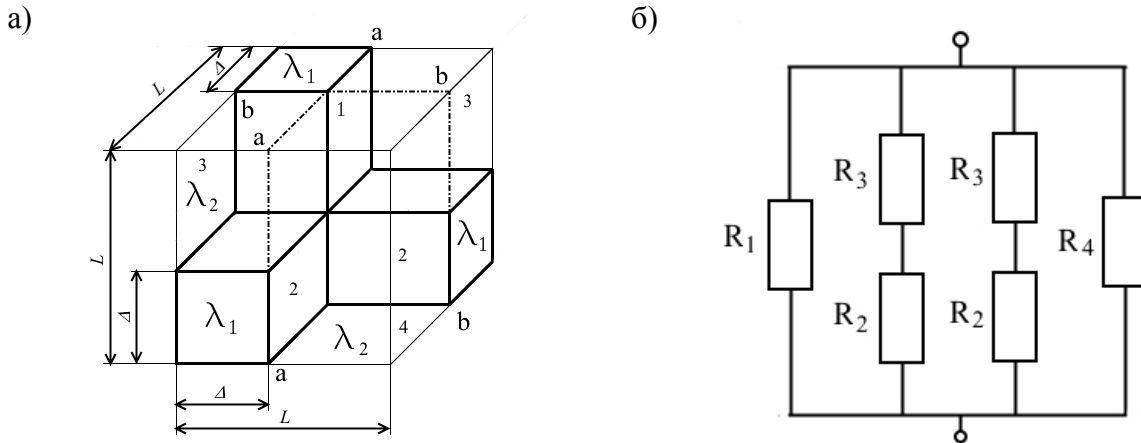


Рисунок 1 – Восьмая часть элементарной ячейки (а) и схема сопротивлений ее различных областей

Объем первой компоненты равен:

$$V_1 = 3 \cdot \Delta^2 \cdot (L - \Delta) + \Delta^3 = 3 \cdot \Delta^2 \cdot L - 2 \cdot \Delta^3. \quad (1)$$

После деления этого выражения на объем $V = L^3$ получим объемную концентрацию первой компоненты

$$m_1 = V_1 / V = c^2 \cdot (3 - 2 \cdot c), \quad (2)$$

где $c = \Delta / L$ – относительный размер стержня. По определению концентрация второй компоненты равна

$$m_2 = 1 - m_1. \quad (3)$$

Для расчета параметра c будем использовать положительный корень кубического уравнения (2), дающий физически оправданные результаты и имеющий вид

$$c = 0.5 + \sin \left[\frac{\arcsin(2 \cdot m_1 - 1)}{3} \right]. \quad (4)$$

Одинаковый результат расчета получается при использовании другого менее удобного положительного корня уравнения (2), приведенного в работе [5].

Зависимости для определения коэффициента эффективной теплопроводности и их экспериментальная проверка

При анализе протекания теплового потока через элементарную ячейку используются различные способы ее разбивки на части. В работе [5] использованы три возможных способа разбиения ячейки адиабатическими и изотермическими плоскостями, а также комбинированное дробление адиабатическими и изотермическими плоскостями. Каждому способу разбиения соответствует своя схема соединения сопротивлений теплового потоку и своя зависимость для определения эффективной теплопроводности. Тепловые сопротивления отдельных частей элементарной ячейки вычисляются по формуле [5]

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

где l_i и S_i – длина линий тока i -той части и площади ее поперечного сечения;

λ_i – теплопроводность i -той части.

Повторим вывод формулы, полученной Г.Н. Дульневым в 1965 году для определения эффективной теплопроводности ячейки, изображенной на рисунке 1а, при ее разбиении адиабатическими плоскостями а-а и б-б, параллельными общему направлению потока тепла, на части 1, 2, 3 и 4. Согласно формулы (5) тепловые сопротивления указанных частей равны:

$$R_1 = \frac{L}{\lambda_1 \cdot \Delta^2}, \quad R_2 = \frac{\Delta}{\lambda_1 \cdot \Delta \cdot (L - \Delta)}, \quad R_3 = \frac{L - \Delta}{\lambda_2 \cdot \Delta \cdot (L - \Delta)}, \quad R_4 = \frac{L}{\lambda_2 \cdot (L - \Delta)^2}. \quad (6)$$

Из схемы взаимного расположения тепловых сопротивлений, приведенной на рисунке 1б, общее тепловое сопротивление $R = L/(\lambda \cdot L^2) = 1/(\lambda \cdot L)$ ячейки объема $V = L^3$, заполненного однородным веществом с эффективной теплопроводностью λ , можно представить следующим образом:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2 + R_3} + \frac{1}{R_1}. \quad (7)$$

Из соотношения (7) с учетом (6) после несложных преобразований получается выражение для искомой относительной эффективной теплопроводности структуры с взаимопроникающими компонентами при дроблении элементарной ячейки адиабатическими плоскостями

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = c^2 + \nu \cdot (1-c)^2 + 2 \cdot \nu \cdot c \cdot (1-c) \cdot (\nu \cdot c + 1 - c)^{-1}, \quad (8)$$

где $\nu = \lambda_2 / \lambda_1$; $c(m_1)$ находится по предложенной нами формуле (4).

Применив разбику элементарной ячейки (рисунок 1а) изотермическими плоскостями Ван-Фрей в 1935 году получил зависимость в виде

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = \left[\frac{1-c}{c^2 + \nu \cdot (1-c^2)} + \frac{c}{c \cdot (2-c) + \nu \cdot (1-c)^2} \right]^{-1}. \quad (9)$$

Для комбинированного дробления этой же ячейки адиабатическими и изотермическими плоскостями Г.Н. Дульневым и В.В. Новиковым в 1977 году получена следующая зависимость [5]:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{c^2 + \nu \cdot c \cdot (1-c)}{\nu \cdot c \cdot (1-c) + (1-c + c^2)} + \nu \cdot \frac{c \cdot (1-c) + \nu \cdot (1-c)^2}{c \cdot (1-c) + \nu \cdot (1-c + c^2)}. \quad (10)$$

Поскольку компоненты в структуре с взаимопроникающими компонентами являются равноправными, то при выполнении расчетов по формулам (8), (9) и (10) неважно, какая из двух компонент будет принята в качестве первой.

Во влажных пенопластах жидкость может полностью или частично смачивать полимерный скелет. В первом случае жидкость и парогазовая смесь образуют структуру с взаимопроникающими компонентами и для расчета эффективной теплопроводности всего материала достаточно одной из трех представленных зависимостей. Во втором случае изолированные капли жидкости (малые или большие) можно рассматривать в качестве включений в парогазовой смеси. Обоснованно утверждается [2, 5], что форма включений несущественно влияет на эффективную проводимость. Поэтому с точки зрения простоты анализа целесообразно использовать кубическую форму включения. Тогда элементарная ячейка простейшей модели структуры с изолированными включениями будет иметь вид куба в кубе с симметрией в двух взаимноперпендикулярных направлениях.

Дробление такой ячейки адиабатическими плоскостями приводит к формуле [5]

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

где m_2 – объемная концентрация включений. Вывод этой формулы был также повторен нами.

Отметим, что в структуре с замкнутыми включениями компоненты геометрически не равноправны и заменять местами их нельзя (непрерывная компонента в формуле (11) всегда должна быть первой).

При изотермическом дроблении элементарной ячейки куб в кубе зависимость имеет вид

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{1 + (\nu - 1) \cdot m_2^{2/3}}{1 + (\nu - 1) \cdot m_2^{2/3} \cdot (1 - m_2^{1/3})}. \quad (12)$$

Комбинированное дробление адиабатическими и изотермическими плоскостями приводит к формуле

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = 1 - \frac{m_2}{(1-\nu)^{-1} - (1+m_2) \cdot (1-m_2^{1/3}) \cdot (1+m_2^{1/3})^{-1}}. \quad (13)$$

Для расчета эффективной теплопроводности двухкомпонентных систем с замкнутыми включениями широкое распространение в литературе получила довольно простая формула Оделевского [11], цитируемая также в [2, 3, 5],

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = 1 - m_2 \cdot \left(\frac{1}{1-\nu} - \frac{1-m_2}{3} \right)^{-1}, \quad (14)$$

результаты вычислений по которой практически совпадают с результатами расчета по формуле (13) и оказываются меньшими, чем по формуле (12).

Авторами работы [2] было рассмотрено около трех десятков формул, содержащих эмпирические коэффициенты и не учитывающих составляющую лучистого переноса тепла. По их мнению, только две из них дают результаты вычислений очень близкие опытным значениям. Если учесть вклад лучистой составляющей теплопроводности, то результаты вычислений по этим формулам будут заметно превышать опытные значения. При этом оказалось, что хорошо предсказывать опытные данные могут еще две формулы. Представляло интерес включить в последующий анализ одну из них, предложенную уже упомянутыми Шутцем и Гликсманом. Их зависимость для определения эффективной теплопроводности двухкомпонентной системы была получена с использованием объемного закона смесей при моделировании структуры одинаковыми кубическими ячейками, в стержнях которых сосредоточено около 80-90% твердого полимера, и имеет вид [2]

$$\lambda = \lambda_1 + \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{3} \cdot f_s \right) \cdot (1-m_1) \cdot \lambda_2, \quad (15)$$

где λ_1 и λ_2 – коэффициент теплопроводности газа и полимерного скелета соответственно;

m_1 – объемная концентрация газа в пенопласте (или твердого полимера m_2 , т.к. $(m_1 + m_2 = 1)$);

f_s – коэффициент, учитывающий объемную концентрацию полимера в стержнях ячеек.

Авторы формулы (15) рекомендуют коэффициент f_s принимать равным 0.8.

Для вычисления лучистой составляющей теплопроводности воспользуемся часто цитируемой зависимостью [1, 2, 3]

$$\lambda_p = 4 \cdot F \cdot \sigma \cdot T_m^3 \cdot \delta, \quad (16)$$

где F – параметр, учитывающий форму ячейки и степень черноты ее стенок;

σ – постоянная Стефана-Больцмана (Stefan-Boltzmann);

T_m – средняя температура образца, К;

δ – средний размер ячейки, м.

Значение параметра F по данным различных авторов [1, 2, 3] изменяется от 0.6 до 0.85. Нами при расчетах было принято $F=0.7$.

Далее было необходимо проверить способность представленных зависимостей предсказывать опытные значения теплопроводности пенопластов λ_o . С этой целью были использованы опытные данные работы [2] для сухих пенополиуретановых образцов различной плотности и одинаковой толщины 50 мм. Измерение величины λ_o производилось при средней температуре $T_m=297$ К, при теплопроводности газа, заполняющего поровое пространство, $\lambda_1=0.25$ Вт/(м·К) и теплопроводности твердого полиуретана $\lambda_2=0.0143$ Вт/(м·К). Результаты опытов и вычислений по анализируемым нами формулам представлены в таблице 1.

Поскольку измеряемое значение теплопроводности λ_o является случайной величиной, то при сравнении опытных значений с расчетными целесообразно использовать случайную ошибку измерения. В данном случае по $n=6$ опытным значениям λ_o построим адекватное уравнение приближенной регрессии и оценим совершаемую при этом ошибку.

Таблица 1. Опытные λ_o [2] и расчетные λ значения коэффициента теплопроводности пенополиуретановых образцов с плотностью ρ , пористостью m и средним размером ячеек δ .

Номер образца	ρ , кг/м ³	m	δ , мкм	$\lambda_o \cdot 100$, Вт/(м·К)	Расчетный коэффициент теплопроводности $\lambda \cdot 100$, Вт/(м·К)								
					номер формулы								
					(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13), (14)	(15)	(16)	(8)+(16)
1	31	0.973	320	1.8	1.68	1.78	1.77	1.87	1.87	1.87	1.69	0.13	1.81
2	50	0.957	410	2.0	1.84	1.97	1.97	2.13	2.14	2.14	1.84	0.17	2.01
3	80	0.930	220	2.2	2.11	2.33	2.33	2.57	2.60	2.59	2.10	0.09	2.20
4	96	0.917	330	2.8	2.25	2.51	2.51	2.79	2.83	2.81	2.22	0.14	2.39
5	173	0.850	340	3.2	2.99	3.47	3.46	3.92	4.03	3.98	2.87	0.14	3.13
6	234	0.797	240	3.6	3.67	4.33	4.29	4.83	5.04	4.93	3.37	0.10	3.77

Опытные данные таблицы 1 адекватно описываются линейным уравнением регрессии:

$$\hat{\lambda}_o = 0.0161 + 0.1028 \cdot (1 - m_1), \quad (17)$$

из которого по аналогии с уравнением (15) следует, что при известных значениях теплопроводности компонент λ_1 и λ_2 и заданном коэффициенте f_s эффективная теплопроводность зависит только от объемной концентрации одной из компонент.

Сумма квадратов отклонений опытных данных относительно линии регрессии (17) равна $SS=1556 \cdot 10^{-8}$. Дисперсию $s^2 = SS/(n-2)=389 \cdot 10^{-8}$ можно принять в качестве оценки ошибки воспроизводимости со степенью свободы $\nu = n - 2 = 4$ и найти оценку стандартного отклонения $s = \sqrt{s^2} = 1.972 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К).

Более точную оценку стандартного отклонения получим при использовании опытных данных работы [12]. По трем выборкам пенополиуретановых образцов различного объема n_i ($i=1..3$), имеющим однородные дисперсии ($n_1=148$, $s_1^2 = 248.43 \cdot 10^{-8}$; $n_2=111$, $s_2^2 = 158.4 \cdot 10^{-8}$; $n_3=14$, $s_3^2 = 229.39 \cdot 10^{-8}$) нами определено выборочное стандартное отклонение $s = 1.535 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К) со степенью свободы $\nu=270$. С учетом первой оценки окончательно получим $s = 1.542 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К) с $\nu=274$. Эту оценку, которая практически характеризует стандартное отклонение σ генеральной совокупности, и будем использовать при различных сравнениях.

Рассматривая таблицу 1 нетрудно заметить, что наиболее точно предсказывает опытные данные зависимость (8) с учетом радиационной составляющей теплопроводности (16). В этом случае только для образца плотностью $\rho = 96$ кг/м³ разница между опытным и расчетным значениями превысил два стандартных отклонения ($2\sigma = 3.08 \cdot 10^{-3}$). Возможно у данного образца по сравнению с другими образцами было большее количество закрытых ячеек. С учетом радиационной составляющей (16) неплохой результат дает формула (15) с коэффициентом $f_s=0.8$, изменяя который можно повысить предсказательную способность этой формулы. По сравнению с формулой (15) зависимость (8) не содержит эмпирических коэффициентов, поэтому она предпочтительнее. Кроме того, отмечается[5], что сопоставление результатов расчетов по формуле (8) с данными многочисленных экспериментов дает хорошие результаты и ее широкое применение вполне оправдано.

Отметим, что наибольший вклад в теплопроводность лучистой составляющей, вычисленный по формуле (16), установлен для образцов плотностью 31 и 50 кг/м³ и равен лишь 7.2 и 8.4%. Для образцов с более высокой плотностью этот вклад уменьшается и не превышает 5.8%.

После учета радиационной составляющей теплопереноса остальные формулы будут перепредсказывать опытные данные с отклонениями, в основном, превышающими два стандартных отклонения 2σ . При уровне значимости $\alpha=0.05$ такие отклонения следует признать статистически значимыми. Формулы (11)-(14), учитывающие структуры с изолированными включениями, дают результаты вычислений близкие между собой и заметно превышающими ре-

зультаты вычислений по формулам (8)-(10), полученным для структуры с взаимопроникающими компонентами. Так, разница значений, вычисленных для условий опытов по формулам (8) и (11) (адиабатическое долбление ячейки), в четырех случаях из шести превышает 2σ . Это косвенно свидетельствует, что структура рассмотренных пенополиуретановых образцов образована преимущественно открытыми ячейками.

Заключение

После изучения ряда публикаций было принято, что структура эксплуатируемых пенопластов образована преимущественно открытыми ячейками. В результате анализа экспериментальных данных и рассмотренных зависимостей для определения эффективной теплопроводности сухих пенопластов образованных преимущественно открытыми ячейками вполне оправдано применение зависимости (8), описывающей перенос тепле в модельной структуре с взаимопроникающими компонентами при адиабатическом дроблении ячейки этой структуры. Можно также использовать очень простую формулу (15), основанную на законе смесей и содержащей эмпирический коэффициент. Для рассмотренных пенополиуретановых образцов расчетные значения лучистой составляющей теплопроводности на фоне ошибки измерения нельзя признать статистически значимыми. Структура пенопластов с мелкими и открытыми ячейками по сравнению со структурой с закрытыми ячейками позволяет снизить теплопроводность материала.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лыков, А.В. Тепломассообмен / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1971. – 560 с.
2. Collishaw, P.G. An assessment of expressions for the apparent thermal conductivity of cellular materials / P.G. Collishaw, J.R.G. Evans // *Journal of Materials Science*. – 1994. – V. 29. – P. 486–498.
3. 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.
4. 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. – V. 49, № 4. – P. 468–475.
5. Дульнев, Г.Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г.Н. Дульнев, В.В. Новиков. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1991. – 248 с.
6. Kan, A. Effective thermal conductivity of open cell polyurethane foam based on fractal theory [Electronic resource] / A. Kan, H. Han // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2013. – V. 2013, Article ID 125267. – Mode of access: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2014/347386/>. – Date of access: 20.08.2017.
7. Hahn, H.T. Hydrothermal damage and graphite / epoxy laminates / H.T. Hahn // *Journal of Engineering Materials and Technology*. – 1987. – V. 109, №1. – P. 3–11.
8. Zarr, R.R. Effects of humidity and elevated temperature on the density and thermal conductivity of a rigid polyisocyanurate foam / R.R. Zarr, T. Nguyen // *Journal of Cellular Plastics*. – 1994. – V. 30. – P. 422–430.
9. Журков, С.Н. Микромеханика разрушения полимеров / С.Н. Журков, В.С. Куксенко, А.И. Слуцкер // *Проблемы прочности*. – 1971. – №2. – С. 45–50.
10. Nikitin, W. Prognozowanie spadku właściwości termoizolacyjnych ocieplenia warstwowych ścian osłonowych / W. Nikitin, A. Łapko // *Awarie Budowlane : materiały XIX konferencja naukowo-techniczna, Szczecin-Miedzyzdroje, 19–22 maja, 1999 r. : w 2 T.* – Szczecin-Miedzyzdroje, 1999. – T. 1. – S. 415–422.
11. Оделевский, В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем / В.И. Оделевский // *Журн. техн. физики*. – 1951. – Т. 21, Вып. 6. – С. 667–685.
12. Domínguez-Muñoz, F. Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials / F. Domínguez-Muñoz, B. Anderson, J.M. Cejudo-López, A. Carrillo-Andrés // *Building Simulation : materials XI International IBPSA Conference, Glasgow, 27–30 july, 2009 y.* – Glasgow, 2009. – P. 1008–1013.