

УДК 691.175.5/.8

## Учет особенностей ячеистой структуры при анализе расчетной теплопроводности газонаполненных полимерных материалов

**Владимир Владимирович ГУРЬЕВ**, доктор технических наук, профессор, e-mail: guryev@fafcc.ru

ФАУ «Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве», 107139 Москва, Орликов пер., 3, стр. 1

**Вадим Иванович НИКИТИН**, доктор технических наук, профессор, e-mail: nik\_ol40@mail.ru

Государственная высшая школа им. Папы Римского Иоанна Павла II, Польша, 21-500 г. Бялая Подляска, ул. Сидорска, 95/97

**Валерий Анатольевич КОФАНОВ**, кандидат технических наук, доцент, e-mail: valkof@mail.ru

УО «Брестский государственный технический университет», Республика Беларусь, 224017 Брест, ул. Московская, 267

**Аннотация.** На основе анализа структуры различных видов газонаполненных полимеров (пенопластов) в процессе эксплуатации показано, что в результате гидротермической деградации возникают дефекты, приводящие к ее изменению с образованием преимущественно сообщающихся ячеек, что позволяет отнести их к структурам с взаимопроникающими геометрически равноправными компонентами. При ее моделировании использована адекватная модель с упорядоченной структурой, состоящей из одинаковых элементарных ячеек. Проникание теплового потока через элементарную ячейку описано с помощью одного из возможных способов теории обобщенной проводимости, а в качестве примера установлена зависимость для определения эффективной теплопроводности материала. Рассмотрен ряд зависимостей для нахождения эффективной теплопроводности ячеистых структур с взаимопроникающими компонентами и с изолированными включениями. Их проверка показала, что опытные данные точнее всего воспроизводятся зависимостями для структур с взаимопроникающими компонентами (открытая ячеистая структура). Лучшие из них рекомендованы для определения теплопроводности как сухих, так и влажных пенопластов.  
**Ключевые слова:** газонаполненные полимерные материалы, ячеистая структура, расчетная теплопроводности, взаимопроникающие компоненты, элементарная ячейка.

### ACCOUNT OF FEATURES OF CELLULAR STRUCTURE WHEN ANALYZING THE CALCULATED THERMAL CONDUCTIVITY OF GAS-FILLED POLYMER MATERIALS

**Vladimir V. GURYEV**, e-mail: guryev@fafcc.ru

Federal Centre for Standardization, Standardization and Technical Conformity Assessment in Construction, Orlikov per., 3, str. 1, Moscow 107139, Russian Federation

**Vadim I. NIKITIN**, e-mail: nik\_ol40@mail.ru

Pope John Paul II State School of Higher Education, ul. Sidorska, 95/97, Biala Podlaska 21-500, Poland

**Valerie A. KOFANOV**, e-mail: valkof@mail.ru

Brest State Technical University, ul. Moskovskaya, 267, Brest 224017, Republic of Belarus

**Abstract.** Based on the analysis of the structure of different types of gas-filled polymers (foams) during operation, it is shown that as a result of hydrothermal degradation, defects arise, leading to its change with the formation of predominantly communicating cells, which makes it possible to attribute them to structures with interpenetrating geometrically equal components. When modeling such a structure, an adequate model with an ordered structure consisting of identical elementary cells was used. The penetration of the heat flux through the unit cell is described using one of the possible methods of the theory of generalized conductivity and, as an example, a dependence is established to determine the effective thermal conductivity of the material. A number of dependencies are considered for determining the effective thermal conductivity of cellular structures with interpenetrating components and with isolated inclusions. An experimental check of these dependencies shows that the experimental data are most accurately reproduced by dependences for structures with interpenetrating components (open cellular structure). The best of them are recommended for determining the thermal conductivity both of dry and wet foams.

**Key words:** gas-filled polymer materials, cellular structure, calculated thermal conductivity, interpenetrating components, elementary cell.

#### Введение

Проблема снижения расходов тепловой энергии на отопление жилых, общественных и промышлен-

ных зданий, эксплуатируемых в условиях холодного климата, вряд ли когда-нибудь утратит актуальность. В настоящее время для ее решения вполне

обоснованно использование ограждающих конструкций с применением высокоэффективных пенопластов.

Теплозащитные свойства теплоизоляционных конструкций обычно характеризуются коэффициентом эффективной теплопроводности, значение которого можно определить экспериментально или расчетом на основе математических моделей, описывающих структуру пористого материала и протекающих в нем процессов переноса тепла. Например, в публикации [1] отмечается необходимость как первого, так и второго взаимосвязанных путей исследования с учетом их слабых и сильных сторон. В этой статье отдается предпочтение второму пути исследования.

При расчетах коэффициента эффективной теплопроводности  $\lambda$  обычно исходят из общепринятого допущения об аддитивности различных механизмов передачи тепла в пористых средах и представляют его в виде суммы коэффициентов кондуктивной  $\lambda_{\text{к}}$ , радиационной  $\lambda_{\text{р}}$  и конвективной  $\lambda_{\text{к}}$  теплопроводности.

Согласно работам [1–3] 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 исследований [3, 4], для пенополиуретановых и фенольных пенопластов плотностью до 115 кг/м<sup>3</sup> 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 ограждающих 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 анализа результатов расчетов, представленных в статье [2], мы не можем рекомендовать какую-либо формулу в качестве наилучшей.

Если не учитывать лучистую и конвективную со-

ставляющие 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 и Рэлея [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 здесь и в других публикациях не уделено должного внимания зависимостям, полученным с помощью методов теории обобщенной проводимости в сочетании с геометрическим моделированием структуры и позволяющим с единых позиций анализировать теплопроводность пенопластов [5]. В данной статье 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 исследованиях [3, 4, 6, 7], следует, что жесткий полимерный каркас состоит из многогранных ячеек (стержень, пленка), грани которых имеют четырех- пяти- и шестиугольную форму. Отмечается, что основная доля полимера-основы сосредоточена преимущественно в прямолинейных стержнях (ребрах), имеющих почти постоянное сечение с незначительными уплотнениями к узлам, которые образованы в результате слияния четырех стержней [3].

В работе [2] оценено, что 80–90 % полимера-основы содержится в стержнях ячеек. Это можно подтвердить приближенными расчетами с использованием опытных данных о среднем размере ячеек и толщине пленок (пластинок) пенополиуретанов [2].

Если принять, что полимерный каркас состоит из закрытых кубических ячеек, а поперечное сечение стержней является квадратным, то для пенополиуретана плотностью 50 кг/м<sup>3</sup>, 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.

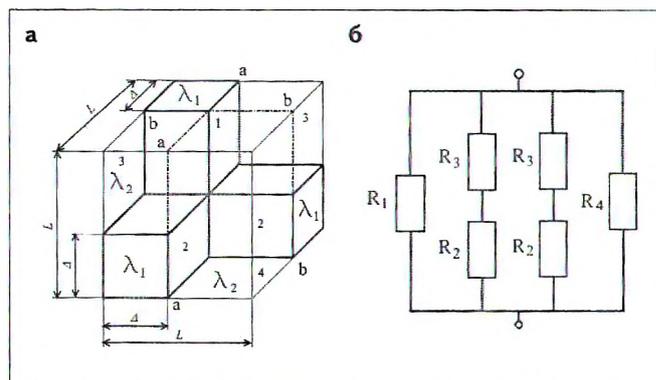
Поскольку сплошность пленочных граней часто нарушена, то многие ячейки являются открытыми и сообщаются между собой. В зависимости от вида полимера и технологии его вспенивания содержание открытых ячеек изменяется в очень широком диапазоне.

По данным работы [3], структура карбамидных пен, полученных воздушно-механическим способом, образована исключительно открытыми ячейками, содержание которых достигает 98 %. Структура фенольных пенопластов также представлена 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 возникает вследствие совместного действия циклически изменяющихся температуры и влажности. Гигротермическая деградация прежде всего обусловлена пластификацией и набуханием полимерного скелета, формированием микропор и поверхностных микротрещин [8, 9].

Из работ [10, 11] следует, что в полимерных материалах образуются 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 [11] 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 раза.

Таким образом, можно принять, что структура эксплуатируемых пенопластов имеет преимущественно сообщающиеся ячейки и ее следует отнести к структурам с взаимопроникающими геометрически равноправными компонентами [5]. Характерная особенность этой структуры — непрерывная протяженность любой компоненты во всех направлениях. При ее моделировании можно воспользоваться наиболее распространенным методом перехода к элементарной ячейке. В этом случае реальная структура материала с взаимопроникающими элементами, которая считается изотропной,



Восьмая часть элементарной ячейки (а) и схема сопротивлений ее различных областей (б)

заменяется адекватной ей моделью с упорядоченной структурой, состоящей из одинаковых элементарных ячеек.

Для пенопластов кубическая форма элементарной ячейки является вполне обоснованной и наиболее простой. Симметрия элементарной ячейки в двух взаимноперпендикулярных направлениях позволяет проводить описание исследуемого процесса в  $1/2$ ,  $1/4$  и  $1/8$  ее части.

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

Объем первой компоненты равен:

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

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

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

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 оправданный результат:

$$c = 0,5 + \sin\left[\frac{\arcsin(2m_1 - 1)}{3}\right]. \quad (4)$$

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

$$R_i = l_i / (\lambda_i S_i), \quad (5)$$

где  $l_i$  и  $S_i$  — длина линий тока  $i$ -той части и площади ее поперечного сечения;  $\lambda_i$  — теплопроводность  $i$ -той части.

Повторим вывод формулы, полученной проф. Г. Н. Дульневим в 1965 г., для определения эффективной теплопроводности ячейки при ее разбиении адиабатическими плоскостями а—а и б—б, параллельными общему направлению потока тепла, на части 1, 2, 3 и 4 (см. рисунок а).

Согласно формуле (5) тепловые сопротивления указанных частей равны:

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

$$R_4 = \frac{L}{\lambda_2 (L - \Delta)^2}.$$

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

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2 + R_3} + \frac{1}{R_4}. \quad (7)$$

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

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

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

Применив разбивку элементарной ячейки (см.

рисунок 1а) изотермическими плоскостями, Ван-Фрей в 1935 г. получил зависимость в виде [5]:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = \left[ \frac{1 - c}{c^2 + v(1 - c)^2} + \frac{c}{c(2 - c) + v(1 - c)^2} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (9)$$

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

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

Поскольку компоненты в структуре с взаимопроникающими компонентами являются равноправными, то при выполнении расчетов по формулам (8)–(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. В этом случае элементарная ячейка простейшей модели структуры с изолированными включениями будет иметь вид куба в кубе с симметрией в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Дробление такой ячейки адиабатическими плоскостями приводит к формуле [5]

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{v - (v - 1)(1 - m_2^3)m_2^{13}}{v - m_2^3(v - 1)}, \quad (11)$$

где  $m_2$  — объемная концентрация включений.

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

При изотермическом дроблении элементарной ячейки куб в кубе зависимость имеет вид:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{1 + (v - 1)m_2^{23}}{1 + (v - 1)m_2^{23}(1 - m_2^{13})}. \quad (12)$$

Комбинированное дробление адиабатическими и изотермическими плоскостями приводит к формуле

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

Для расчета эффективной теплопроводности двухкомпонентных систем с замкнутыми включениями широкое распространение получила довольно простая формула Оделевского [12]:

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

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 очень близкие опытным значениям. Если учесть вклад лучистой составляющей теплопроводности, то результаты расчетов по этим формулам будут заметно превышать опытные значения. При этом оказалось, что хорошо прогнозировать опытные данные могут еще две формулы. Представляло интерес включить в последующий анализ одну из них, предложенную в работе [2]. 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]:

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

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности газа и полимерного скелета соответственно;  $m_1$  – объемная концентрация газа в пенопласте ( $m_1 + m_2 = 1$ );  $f_s$  – 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 [1–3]:

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

где  $F$  – параметр, учитывающий форму ячейки и степень черноты ее стенок;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $T_m$  – средняя температура образца, К;  $\delta$  – средний размер ячейки, м.

Значение параметра  $F$ , по данным авторов работ [1–3], изменяется от 0,6 до 0,85. В этой статье при расчетах было принято  $F = 0,7$ .

Далее необходимо проверить способность предложенных зависимостей предсказывать опытные значения теплопроводности пенопластов  $\lambda_o$ . С этой целью были использованы опытные данные работы

[2] для сухих пенополиуретановых образцов различной плотности и одинаковой толщины 50 мм. Образцы вырезаны из эксплуатируемых промышленных изделий. Измерение величины  $\lambda_o$  производилось при средней температуре  $T_m = 297$  К, при теплопроводности газа, заполняющего поровое пространство,  $\lambda_1 = 0,0143$  Вт/(м·К) и теплопроводности твердого полиуретана  $\lambda_2 = 0,25$  Вт/(м·К). Результаты опытов и вычислений по анализируемым формулам представлены в таблице.

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

Опытные данные таблицы адекватно описываются линейным уравнением регрессии:

$$\hat{\lambda}_o = 0,0161 + 0,1028(1 - m_1), \quad (17)$$

из которого по аналогии с уравнением (15) следует, что при известных значениях теплопроводности компонент  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  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  $\sum S = 1556 \cdot 10^{-8}$ . Дисперсию  $s^2 = \sum S / (n - 2) = 389 \cdot 10^{-8}$  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 [13]. 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  $\sigma$  генеральной совокупности, и будем использовать при различных сравнениях.

По таблице можно определить, что наиболее точно прогнозирует опытные данные зависимость (8) с учетом радиационной составляющей теплопроводности (16). В этом случае только для образца плотностью  $\rho = 96$  кг/м<sup>3</sup> разница между опытным и расчетным значениями превысила два стандартных отклонения  $2\sigma = 3,08 \cdot 10^{-3}$ .

Возможно, у данного образца по сравнению с

Опытные  $\lambda_0$  [2] и расчетные  $\lambda$  значения коэффициентов теплопроводности пенополиуретановых образцов с плотностью  $\rho$ , пористостью  $m$  и средним размером ячеек  $\delta$

| Номер образца | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $m$   | $\delta$ , мкм | $\lambda_0 \cdot 100$ , Вт/(м·К) | Коэффициент теплопроводности $\lambda \cdot 100$ , Вт/(м·К), рассчитанный по формулам |      |      |      |      |            |      |      |          |  |
|---------------|----------------------------|-------|----------------|----------------------------------|---|------|------|------|------|------------|------|------|----------|--|
|               |                            |       |                |                                  | (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                                | 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 | 2,6  | 2,59       | 2,10 | 0,09 | 2,2      |  |
| 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 | 0,1  | 3,77     |  |

другими 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 уравнением (15) зависимость (8) не содержит эмпирических коэффициентов, поэтому она предпочтительнее. Кроме того, сопоставление результатов расчетов по формуле (8) с данными многочисленных экспериментов дает хорошие результаты, поэтому ее широкое применение вполне оправданно [5].

Отметим, что наибольший вклад в теплопроводность лучистой составляющей, вычисленной по формуле (16), установлен для образцов плотностью 31 и 50 кг/м<sup>3</sup> 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  $2\sigma$ . 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 превышающие результаты расчетов по формулам (8)–(10), полученным для структуры с взаимопроникающими компонентами. Так, разница значений, вычисленных для условий опытов по формулам (8) и (11) (адиабатическое дробление ячейки), в четырех случаях из шести превышает  $2\sigma$ . Это косвенно свидетельствует, что структура рассмотренных пенополиуретановых образцов имеет преимущественно сообщающиеся ячейки.

#### Вывод

Применительно к теплоизоляции зданий основная деградация газонаполненных полимерных ма-

териалов происходит вследствие циклически изменяющихся температуры и влажности. Такая гигротермическая деградация со временем приводит к образованию макротрещин, ширина которых превышает толщину пленок и даже стержней ячеек (до 0,1 мм). При этом сокращается количество закрытых ячеек и соответственно расчет теплопроводности газонаполненных полимерных материалов целесообразно проводить с учетом того, что их структура имеет преимущественно сообщающиеся ячейки.

Для расчета теплопроводности газонаполненных полимерных материалов предложено достаточно большое количество зависимостей, учитывающих особенности открыто- и закрытоячеистых структур. Статистически обоснованное сравнение результатов расчетов с данными измерений теплопроводности шести пенополиуретановых образцов, вырезанных из эксплуатируемых промышленных изделий и имеющих различную плотность (от 31 до 234 кг/м<sup>3</sup>), показало, что вполне оправдано применение зависимости (8), описывающей перенос тепла в модельной структуре с взаимопроникающими компонентами при адиабатическом дроблении ячейки этой структуры.

Зависимости (11)–(14), описывающие перенос тепла в модели с закрытыми ячейками, дают результаты, которые статистически значимо превышают результаты расчетов по формуле (8) и опытные данные, что косвенно подтверждает предположение о том, что рассмотренные пенополиуретановые образцы в условиях эксплуатации имеют преимущественно структуру с сообщающимися ячейками. Зависимости (11)–(14) можно использовать при расчетах влажных материалов в случае, когда капли жидкости следует рассматривать в качестве включений в поровом пространстве.

С учетом ошибки опытов расчетные значения лучистой составляющей теплопроводности нельзя признать статистически значимыми.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Лыков А. В. Теплообмен. М.: Энергия, 1971. 560 с.
1. Lykov A. V. *Teplomassoobmen* [Heat and mass transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1971. 560 p. (In Russian).
2. Collishaw P. G., Evans J. R. G. An assessment of expressions for the apparent thermal conductivity of cellular materials [Оценка выражений для очевидной теплопроводности ячеистых материалов]. *Journal of Materials Science*, 1994, vol. 29, pp. 486–498.
3. Гурьев В. В., Жолудов В. С., Петров-Денисов В. Г. Тепловая изоляция в промышленности. Теория и расчет. М.: Стройиздат, 2003. 416 с.
3. Gur'ev V. V., Zholidov V. S., Petrov-Denisov V. G. *Teplovaya izolyatsiya v promyshlennosti. Teoriya i raschet* [Thermal insulation in industry. Theory and calculation]. Moscow, Sroyizdat Publ., 2003. 416 p. (In Russian).
4. Shi M., Li X., Chen Y. Determination of effective thermal conductivity for polyurethane foam by use of fractal method [Определение эффективной теплопроводности пенополиуретана с использованием фрактального метода]. *Science in China Series E. Technological Sciences*, 2006, vol. 49, no 4, pp. 468–475. (In Russian).
5. Дутьнев Г. Н., Новиков В. В. Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отд-е, 1991. 248 с.
5. Dul'nev G. N., Novikov V. V. *Protsessy perenosa v neodnorodnykh sredakh* [Transport processes in inhomogeneous media]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1991. 248 p. (In Russian).
6. Kan A., Han H. Effective thermal conductivity of open cell polyurethane foam based on fractal theory [Эффективная теплопроводность открытой ячейки пенополиуретана на основе фрактальной теории]. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2013/125267> (accessed 20.08.2017).
7. Baillis D., Coquard R., Cunsolo S. Effective conductivity of Voronoi's closed- and open-cell foams: analytical laws and numerical results [Эффективная проводимость закрытых и открытых ячеек Вороного: аналитические законы и численные результаты]. *Journal of Materials Science*, 2017, vol. 52, no 19, pp. 11146–11167.
8. Hahn H.T. Hydrothermal damage and graphite/epoxy laminates [Гидротермальные повреждения и графитовые / эпоксидные слоистые материалы]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1987, vol. 109, no. 1, pp. 3–11.
9. Zarr R. R., Nguyen T. Effects of humidity and elevated temperature on the density and thermal conductivity of a rigid polyisocyanurate foam [Влияние влажности и повышенной температуры на плотность и теплопроводность жесткого пенополиизоцианурата]. *Journal of Cellular Plastics*, 1994, vol. 30, pp. 422–430.
10. Журков С. Н., Куксенко В. С., Слутскер А. И. Микромеханика разрушения полимеров // Проблемы прочности. 1971. № 2. С. 45–50.
10. Zhurkov S. N., Kuksenko V. S., Slutsker A. I. *Micromechanics of polymer destruction. Problemy prochnosti*, 1971, no. 2, pp. 45–50. (In Russian).
11. Nikitin W., Lapko A. Prognozowanie spadku wlasciwosci termoizolacyjnych ocieplenia warstwowych scian oslonowych [Прогнозирование снижения теплоизоляционных свойств изоляции сэндвич-панелей]. *Awarie Budowlane: materialy XIX konferencja naukowo-techniczna, Szczecin-Miedzyzdroje*, 19–22 maja, 1999. Szczecin-Miedzyzdroje, 1999. Т. 1. Рр. 415–422.
12. Оделевский В. И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем // Журнал технической физики. 1951. Т. 21. Вып. 6. С. 667–685.
12. Odelevskiy V. I. Calculation of the generalized conductivity of heterogeneous systems. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1951, vol. 21, Iss. 6, pp. 667–685. (In Russian).
13. Dominguez-Munoz F., Anderson B., Cejudo-Lopez J. M., Carrillo-Andres A. Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials [Неопределенность в теплопроводности изоляционных материалов]. *Building Simulation : materials XI International IBPSA Conference, Glasgow, July 27–30 2009*, Pp. 1008–1013.

Для цитирования: Гурьев В. В., Никитин В. И., Кофанов В. А. Учет особенностей ячеистой структуры при анализе расчетной теплопроводности газонаполненных полимерных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 9. С. 98–104.

For citation: Guryev V. V., Nikitin V. I., Kofanov V. A. Account of Features of Cellular Structure when Analyzing the Calculated Thermal Conductivity of Gas-Filled Polymer Materials. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2018, no. 9, pp. 98–104. ■

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

НАПОМИНАЕМ, ЧТО НАЧАЛАСЬ ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ  
**«ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»**  
 НА ПЕРВОЕ ПОЛУГОДИЕ 2019 г.