

Игорь Яковлевич Киселёв

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПЕНОПЛАСТОВ

Олкат (Allcut E.A.) [1] исследовал зависимость теплопроводности ячеистых материалов, в частности, пенополистирола и пробки от плотности. Им установлено, что для ячеистых материалов при плотности, меньшей определенного для каждого материала значения, имеет место увеличение теплопроводности при уменьшении их плотности. Причина этого увеличения - рост радиационной составляющей теплового потока через материал при уменьшении его плотности.

Тай (Tye R.P.) [2] предложил следующую эмпирическую формулу для описания экспериментально полученной Олкатом U-образной зависимости теплопроводности λ ячеистых теплоизоляционных материалов от плотности γ_0 :

$$\lambda(\gamma_0) = A + B\gamma_0 + C/\gamma_0 \quad (1)$$

где A , B и C - эмпирические константы.

Тай [2] предложил следующую физическую интерпретацию слагаемых в правой части формулы (1):

- значение первого слагаемого A определяется тем, какую долю от общего потока тепла через материал составляет поток, проходящий через материала за счет кондукционного теплопереноса через газ, находящийся в его порах;
- значение второго слагаемого $B\gamma_0$ определяется тем, какую долю от общего потока тепла через материал составляет поток, проходящий через материал за счет кондукционного теплопереноса через его матрицу;
- значение третьего слагаемого C/γ_0 определяется тем, какую долю от общего потока тепла через материал составляет радиационный тепловой поток.

Олкат [1], Фишенден (Fishenden M.) [3], Вершор (Vershooor J.D.) [4] теоретически доказали и экспериментально подтвердили, что ячеистых материалов с диаметром пор, равным нескольким мкм, т.е. для современных эффективных теплоизоляционных материалов, при давлении газов в порах, не превышающим значительно атмосферное давление, и температуре газа в порах, не превышающей $+80^\circ\text{C}$, конвекционная составляющая теплопроводности газов в порах много меньше, чем кондукционная составляющая теплопроводности этих

газов. Диденко, Корепанов и Юркевич [5] теоретически исследовали процесс кондукционного, конвекционного и радиационного теплопереноса через поры строительных материалов. Они показали, что доля конвекционной составляющей потока тепла через поры, диаметр которых равен 1 мм или меньше, не превышает 0,1% от общего потока тепла через поры. Поэтому ниже, при анализе процесса теплопереноса через современные пенопласты не учитывался конвекционный теплоперенос через газы в порах этих материалов.

Вершор [4] рассмотрел кондукционный перенос тепла через поры материалов на основании кинетической теории газов и показал, что:

$$A = \lambda_{cdg} = \lambda_g \frac{D}{D + l_g} \quad (2)$$

где: λ_{cdg} - кондукционная составляющая теплопроводности газа в порах, [Вт/(м·°С)], λ_g - кондукционная теплопроводность газа в объеме много большим, чем объем поры [Вт/(м·°С)], D - диаметр поры ячеистого материала [м], l_g - средняя длина свободного пробега молекул газа [м].

Средняя длина пробега молекул газа равна [6]:

$$l_g = \frac{RT}{\pi\sqrt{2} \cdot d^2 p N_A} \quad (3)$$

где: $R = 8,3140 \cdot 10^3$ Дж/(К·кмоль) - универсальная газовая постоянная, T - абсолютная температура [К], d - диаметр молекул газа [м], p - давление [Па], $N_A = 6,023 \cdot 10^{26}$ кмоль⁻¹ - число Авогадро.

Из (2) и (3) следует, что для ячеистых материалов:

$$A = \lambda_g \cdot \frac{D}{D + \frac{RT}{\pi\sqrt{2} \cdot d^2 p N_A}} \quad (4)$$

Полагая в соответствии с молекулярной теорией газов [6], что размеры молекулы газа определяются ее ван-дер-ваальсовым радиусом и подставляя значения этих радиусов [6] в формулу (3), получим, что при температуре $T = 300$ К и нормальном атмосферном давлении средняя длина свободного пробега молекул газов, входящих в состав воздуха, равняется $5 \cdot 10^{-8}$ м, а молекул фреонов, первоначально заполняющих поры пенопластов - $2 \cdot 10^{-8}$ м.

Из вышеизложенного следует, что для современных эффективных ячеистых теплоизоляционных материалов, диаметр пор которых равен 2-3 мкм, средняя длина свободного пробега молекул газов, входящих в состав воздуха, и фреонов, которые первоначально находятся в порах пенопластов, также много меньше диаметра пор D , т.е.:

$$l_g \ll D \quad (5)$$

Следовательно, кондукционная составляющая теплопроводности газов в порах современных ячеистых теплоизоляционных материалов равна теплопроводности этих газов в объеме, много большем объема пор.

На основании соотношения (4) и неравенства (5), с учетом того, что теплопроводность газов зависит от температуры, запишем:

$$A = \lambda_g(\Theta) = \lambda_{g25} [1 + f_{\Theta g}(\Theta - 25)] \quad (6)$$

где: Θ - температура [$^{\circ}\text{C}$], λ_{g25} - теплопроводность газа при температуре $+25^{\circ}\text{C}$ [$\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$], $f_{\Theta g}$ - коэффициент пересчета теплопроводности газа по температуре [$1/^{\circ}\text{C}$].

Значения величин λ_{g25} , $f_{\Theta g}$ и молекулярной массы газов, которые находятся в порах эффективных теплоизоляционных материалов, приведены в таблице 1 [7].

ТАБЛИЦА 1

Теплопроводность, коэффициент пересчета теплопроводности по температуре и молярная масса газов [7]

Газ	Теплопроводность λ_{g25} [Вт/(м·°C)]	Коэффициент $f_{\Theta g}$ [1/°C]	Молярная масса [кг/моль]
Воздух	0,0261	0,0030	29,0
Углекислый газ CO_2	0,0164	0,0045	44,0
Фреон-11 CCl_3F	0,0083	0,0054	120,9
Фреон-12 CCl_2F_2	0,0101	0,0051	137,4

Так как значение слагаемого $B\gamma_0$ формуле (1) определяется тем, какую долю от общего потока тепла через материал составляет поток, проходящий через материал за счет кондукционного теплопереноса через его матрицу, то с учетом того, теплопроводность матрицы зависит от температуры, запишем:

$$B\gamma_0 = \lambda_{cds} = K_B \frac{\lambda_s(\Theta)}{\gamma_s} \gamma_0 = K_B \frac{\lambda_{s25} [1 + f_{\Theta s}(\Theta - 25)]}{\gamma_s} \gamma_0 \quad (7)$$

где: λ_{cds} - кондукционная составляющая теплопроводности теплоизоляционного материала, значение которой определяется теплопроводностью матрицы [$\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$], K_B - эмпирическая безразмерная константа, λ_s - теплопроводность матрицы [$\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$], λ_{s25} - теплопроводность матрицы при температуре $+25^{\circ}\text{C}$ [$\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$], $f_{\Theta s}$ - коэффициент пересчета теплопроводности матрицы по температуре [$1/^{\circ}\text{C}$], γ_s - плотность матрицы [$\text{кг}/\text{м}^3$].

Значения величины λ_{s25} , $f_{\Theta s}$ и плотности материалов, образующих матрицу пенопластов, приведены в таблице 2 [7].

ТАБЛИЦА 2

Теплопроводность, коэффициент пересчета теплопроводности по температуре и плотность материалов, образующих матрицу

Материал	Теплопроводность λ_{s25} [Вт/(м·°C)]	Коэффициент $f_{\Theta s}$ [1/°C]	Плотность [кг/м ³]
Полистирол	0,132	0,0033	1050
Полиуретан	0,355	0,0026	1250

Так как значение третьего слагаемого C/γ_0 в формуле (1) определяется тем, какую долю от общего потока тепла через материал составляет радиационный тепловой поток, то с учетом того, что согласно работе Стронга (Strong Н.М.) [8], радиационная составляющая теплопроводности теплоизоляционного материала прямо пропорциональна диаметру пор ячеистых материалов, третьей степени абсолютной температуры и обратно пропорциональна f - доле объема теплоизоляционного материала, приходящегося на матрицу, запишем:

$$\frac{C}{\gamma_0} = \lambda_r = \frac{K_C D \sigma_r T^3}{f} \quad (8)$$

где: λ_r - радиационная составляющая теплопроводности теплоизоляционного материала [Вт/(м·°C)], K_C - эмпирическая безразмерная константа, $\sigma_r = 5,670 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) - постоянная Стефана-Больцмана, D - диаметр волокна или поры [м], $T = (\Theta + 273,15)$, К; $f = \gamma_0/\gamma_s$

или:

$$\frac{C}{\gamma_0} = \lambda_r = \frac{K_C D \gamma_s \sigma_r (\Theta + 273,15)^3}{\gamma_0} \quad (9)$$

Суммируя все изложенное, запишем:

$$\begin{aligned} \lambda(\gamma_0, \gamma_s, D, \Theta, f_{\Theta g}, f_{\Theta s}, \lambda_{g25}, \lambda_{s25}) &= A + B\gamma_0 + C/\gamma_0 = \lambda_{cdg} + \lambda_{c ds} + \lambda_r = \\ &= \lambda_{g25} [1 + f_{\Theta g} (\Theta - 25)] + K_B \lambda_{s25} [1 + f_{\Theta s} (\Theta - 25)] \frac{\gamma_0}{\gamma_s} + K_C D \sigma_r (\Theta + 273,15)^3 \frac{\gamma_s}{\gamma_0} \end{aligned} \quad (10)$$

Используя метод нахождения экстремумов функций применительно к зависимости (10), получим:

$$\gamma_{\min}(\gamma_s, D, \Theta, f_{\Theta s}, \lambda_{s25}) = \gamma_s \sqrt{\frac{K_C D \sigma_r (\Theta + 273,15)^3}{K_B \lambda_{s25} [1 + f_{\Theta s} (\Theta - 25)]}} \quad (11)$$

$$\lambda_{\min}(D, \Theta, f_{\Theta g}, \lambda_{g25}) = \lambda_{g25} [1 + f_{\Theta g} (\Theta - 25)] + 2 \sqrt{K_B K_C D \sigma_r \lambda_{g25} [1 + f_{\Theta g} (\Theta - 25)] (\Theta + 273,15)^3} \quad (12)$$

где: γ_{\min} - плотность теплоизоляционного материала, при которой его теплопроводность минимальна [кг/м³], λ_{\min} - минимальное значение теплопроводности [Вт/(м·°С)].

Полученные путем статистической обработки результатов измерения теплопроводности значения констант K_B и K_C равны: для пенополистирола (ППС) 0,565 и 40,0; пенополиуретана (ППУ) 0,500 и 40,0.

Функциональные соотношения (10)-(12) определяют зависимость теплопроводности λ ячеистых теплоизоляционных материалов, а также значений γ_{\min} и λ_{\min} от плотности материала γ_0 , плотности его матрицы γ_s , диаметра пор D , теплопроводности газа λ_g , заполняющего его поры, теплопроводности матрицы λ_s и коэффициентов пересчета по температуре теплопроводности газа $f_{\Theta g}$ и матрицы $f_{\Theta s}$.

Особый интерес представляет зависимость теплопроводности пенопластов от теплопроводности газов в их порах. ППС и ППУ являются пенопластами, которые широко применяются для теплоизоляции наружных ограждающих конструкций зданий. В процессе изготовления ППС и ППУ в качестве поробразующих газов используются, в частности, фреоны 11 и 12. В процессе эксплуатации фреоны в порах этих пенопластов полностью замещаются воздухом, теплопроводность которого в 2,5-3 раза больше теплопроводности фреонов (см. таблицу). Скорость процесса замещения зависит от температуры, размеров изделия из пенопласта, наличия на поверхности изделия пленок и обкладок. В различных условиях эксплуатации ППС и ППУ в наружных ограждающих конструкциях зданий процесс замещения фреонов в их порах воздухом практически заканчивается через 2-3 года [9, 10].

Ниже в качестве примера приведены зависимость $\lambda(\gamma_0)$ и значения γ_{\min} и λ_{\min} при температуре +25°С для ППС с диаметром пор равным 2,5 мкм и ППУ с диаметром пор 2 мкм, вычисленные по формулам (10)-(12).

Свежеизготовленный ППС:

$$\begin{aligned} \lambda_{25}(\gamma_0) &= 0,0083 + 0,0710 \cdot 10^{-3} \gamma_0 + 0,160/\gamma_0 \\ \lambda_{\min} &= 0,0150 \text{ Вт/(м·°С)}, \quad \gamma_{\min} = 47,5 \text{ кг/м}^3 \end{aligned} \quad (13)$$

Состаренный ППС, т.е. ППС, поры которого заполнены воздухом:

$$\begin{aligned} \lambda_{25}(\gamma_0) &= 0,0261 + 0,0710 \cdot 10^{-3} \gamma_0 + 0,160/\gamma_0 \\ \lambda_{\min} &= 0,0328 \text{ Вт/(м·°С)}, \quad \gamma_{\min} = 47,5 \text{ кг/м}^3 \end{aligned} \quad (14)$$

Свежеизготовленный ППУ:

$$\begin{aligned} \lambda_{25}(\gamma_0) &= 0,0083 + 0,142 \cdot 10^{-3} \gamma_0 + 0,151/\gamma_0 \\ \lambda_{\min} &= 0,0176 \text{ Вт/(м·°С)}, \quad \gamma_{\min} = 32,6 \text{ кг/м}^3 \end{aligned} \quad (15)$$

Состаренный ППУ:

$$\begin{aligned}\lambda_{25}(\gamma_0) &= 0,0261 + 0,142 \cdot 10^{-3} \gamma_0 + 0,151/\gamma_0 \\ \lambda_{\min} &= 0,0354 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}, \quad \gamma_{\min} = 32,6 \text{ кг/м}^3\end{aligned}\quad (16)$$

Из (13)-(16) следует, что вследствие замещения фреонов в порах ППС и ППУ воздухом, их теплопроводность увеличивается примерно в два раза. Следовательно, этот процесс является важнейшей причиной увеличения теплопроводности ППС и ППУ в процессе их эксплуатации в наружных ограждающих конструкциях зданий.

Литература

- [1] Allcut E.A., General Discussion on Heat Transfer, London 1951, 92 p.
- [2] Tye R.P., Thermal Conductivity, London - New York 1969, vol. 1, 442 p.
- [3] Fishenden M., An Introduction to Heat Transfer, Oxford 1961, 106 p.
- [4] Verschoor J.D., Theoretical design requirements for improving the insulating properties of materials, Trans. Amer. Soc. Mechan. Eng. 1952, 74, 961-974.
- [5] Диденко В.Н., Корепанов Е.В., Юркевич А.А., Прогнозирование коэффициента теплопроводности строительных материалов с учетом конвекционного теплообмена в воздушных полостях и порах, В кн. Проблемы энерго-, ресурсосбережения и охраны окружающей среды, ИжГТУ, Ижевск 2008, 29-34.
- [6] Физический энциклопедический словарь, Т. 3, М.: 1963, 594 с.
- [7] Физические величины. Справочник, М.: 1991, 1232 с.
- [8] Strong H.M., The heat conduction along solid paths in a random arrangement of fibers, J. Appl. Phys. 1960, 31, 39-44.
- [9] Glicksman L.R., Schuetz M.A., A basic study of heat transfer through foam insulation, J. Cell. Plastics 1984, March-April, 114-121.
- [10] Киселёв И.Я., Теплоперенос через волокнистые и ячеистые эффективные материалы, Материалы научно-технической конференции «Строительная физика в XXI веке», 2006, 58-64.

Współczynnik przewodzenia ciepła styropianów

Streszczenie

Uzyskano zależność, która opisuje powiązanie pomiędzy współczynnikiem przewodzenia ciepła a jego gęstością, ilością gazu w porach, średnicą porów i temperaturą.

Słowa kluczowe: styropian, współczynnik przewodzenia ciepła, temperatura, starzenie

Thermal conductivity of the foam plastics

Abstract

The relationships are obtained, which describe the interdependence between thermal conductivity of foam plastics and its density, thermal conductivity and density of its matrix, thermal conductivity of gas in its pores, the diameter of its pores and temperature.

Keywords: foam plastics, thermal conductivity, temperature, aging