УДК 538.931

DOI: 10.18384/2310-7251-2021-2-52-60

ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ СЛУЧАЙНОЙ РАССЕИВАЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

Шампаров Е. Ю., Бугримов А. Л., Родэ С. В., Жагина И. Н.

Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии.

Дизайн. Искусство)

117997, г. Москва, ул. Садовническая, д. 33, Российская Федерация

Аннотация

Цель. Определение взаимосвязи между параметрами структуры материалов и показателями их теплозащитных свойств.

Процедура и методы. Теоретический анализ и сопоставление теории и эксперимента на основании результатов двух методов практических измерений компонент теплопроводности случайной рассеивающей среды.

Результаты. Описана методика измерения лучистой и кондуктивной компонент и суммарной теплопроводности среды с помощью экранов излучения. Найден новый способ измерения компонент теплопроводности при сжатии волокнистого холста. Измерены показатели теплозащитных свойств ряда выпускаемых утепляющих материалов.

Теоретическая и/или практическая значимость. Установлено, что кондуктивная компонента теплопроводности лёгких утепляющих материалов практически равна теплопроводности воздуха, а лучистая компонента обратно пропорциональна плотности структуры. Определены кондуктивный и радиационный показатели среды.

Ключевые слова: радиационно-кондуктивный перенос тепла, случайная рассеивающая структура

MEASUREMENT OF THERMAL PROTECTION PROPERTY METRICS OF A RANDOM SCATTERING STRUCTURE

E. Shamparov, A. Bugrimov, S. Rode, I. Jagrina

The Kosygin State University of Russia

ul. Sadovnicheskaya 33, 117997 Moscow, Russian Federation

Abstract

Aim. We determine the relationship between the parameters of a materials structure and metrics of their thermal protection properties.

Methodology. Use is made of a theoretical analysis and comparison of theory and experiment based on the results of two methods of practical measurements of the thermal conductivity components of a random scattering medium.

Results. A method for measuring the radiant, conductive and total heat transfer coefficient of the medium using screens is described. A new method for determining the components of heat

transfer with use the compression of the canvas is found. Metrics of heat-shielding properties of materials are measured.

Research implications. It is found that the conductive component of the thermal conductivity of light insulation materials is almost equal to the thermal conductivity of air, and the radiant component is inversely proportional to the density of the structure. The conductive and radiation parameters of the medium are determined.

Keywords: radiant-conductive heat transfer, random scattering structure

Введение

Современные лёгкие теплозащитные материалы имеют вспененную или волокнистую структуру с характерным размером неоднородностей порядка 100 мкм. Когда доля заполненного твёрдым веществом пространства около 1%, уже по визуальной оценке материала видно, что глубина проникновения в него теплового излучения значительно превышает размер неоднородностей. Распространение излучения в таких случайных рассеивающих структурах должно иметь диффузный характер. Основной механизм, препятствующий прохождению излучения, – рассеяние на неоднородностях. Но, с другой стороны, размеры неоднородностей много больше, чем длины волн теплового излучения. Поэтому глубина проникновения a практически не должна зависеть от частоты теплового излучения. Для излучения такой материал можно считать однородной бездисперсионной (серой) средой. Свойства такой среды характеризуют её кондуктивная D и лучистая L составляющие теплопроводности λ :

$$\lambda = D + L.$$

Вдалеке от границ в среде выполняется уравнение Фурье в обобщённой форме:

$$\Phi = -\lambda \nabla T,$$

где Φ – плотность потока тепла, ∇T – градиент температуры.

Лучистая составляющая теплопроводности среды [1; 2]:

$$L = 16\sigma T^3 a / 3,$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Задачи по переносу тепла обычно решают численно [2; 3]. Сложность определения лучистой и кондуктивной компонент теплопроводности по отдельности обусловлена тем, что обе они входят в уравнение теплового переноса в одной и той же форме. Но недавно в работе [4] получено аналитическое решение задачи о радиационно-кондуктивном переносе тепла с постоянной плотностью потока Φ возле плоской непрозрачной поверхности (со светимостью ϵ) при малом градиенте температуры:

$$\nabla T \ll T/a.$$

Зависимость температуры от расстояния x до границы среды с температурой $T_0 + \beta$ имеет вид:

$$T = T_0 + \nabla T_{\infty} x + \beta \cdot \exp(-\gamma x / a),$$

где $\nabla T_{\infty} = -\Phi / \lambda$ – градиент температуры вдали от границы, a/γ – толщина радиационно-кондуктивной релаксации,

$$\gamma^2 = \lambda / D,$$

β – скачок температуры возле удалённой поверхности

$$\beta = -a \nabla T_{\infty} (\gamma^2 - 1) / (\gamma + \gamma^2 \varepsilon / (2 - \varepsilon)).$$

Кроме того, была решена задача о радиационно-кондуктивном переносе тепла между двумя плоскостями, разделёнными полупрозрачной средой толщиной d , известная как задача Висканты и Гроша [5]. Разность температур плоскостей:

$$\Delta T = \nabla T_{\infty} d - 2\beta \cdot \tanh(\gamma d / (2a)).$$

Измерения с экранами излучения

Для исследований разработана установка для измерения тепловой проницаемости материалов без конвекции [6]. В ней нагреватель помещён строго над холодильником, а за нагревателем расположен тепловой экран. Образец помещается в зазор между горизонтальными поверхностями нагревателя и холодильника, сделанными для большей светимости из монокристаллического кремния. При измерении стабилизируются температуры холодильника и теплового экрана. В нагревателе выделяем такую мощность, чтобы его температура не изменялась и была равной температуре экрана. Тогда эта мощность идёт сквозь образец от нагревателя к холодильнику. Толщина зазора мала по сравнению с размерами нагревателя и холодильника. Поэтому плотность потока тепла можно считать одинаковой во всем объёме образца, что соответствует условиям задачи Висканты и Гроша. На рис. 1 представлены результаты измерения зависимости теплового сопротивления $R = \Delta T / \Phi$ среды (пакета образцов) от её толщины d . Образцы вырезаны из пласта вспененного полиэтилена (толщиной 2,2 мм и долей заполненного твёрдым веществом пространства – 1,74%). В следующей серии измерений между всеми слоями пакета проложены экраны излучения из тонкой (10 мкм) алюминиевой фольги. В третьей серии экраны проложены только сверху и снизу пакета.

Рис. 1 / Fig. 1. Тепловое сопротивление R в зависимости от толщины пакета d : 1 – без фольги, 2 – с фольгой сверху, снизу и между всеми слоями и 3 – с фольгой сверху и снизу пакета. На вставке – зависимость $X(d)$ / Thermal resistance R depending on the package thickness d : 1 – without foil, 2 – with foil on top, bottom and between all layers, and 3 – with foil on top and bottom of the package. On the inset, there is dependency $X(d)$.

Источник: составлено авторами

По наклону графика № 1 на рис. 1 вычислена суммарная теплопроводность среды:

$$\lambda = \Delta d / \Delta R = 0,051 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}).$$

Используя λ и данные графика № 3 (при $\epsilon = 0$ для фольги), вычислен параметр X :

$$X = R\lambda - d = \frac{2a(\gamma^2 - 1)}{\gamma} \tanh \frac{\gamma d}{2a}.$$

Численная аппроксимация $X(d)$ позволила определить значения $a = 2,9$ мм, $\gamma = 1,38$, $L = 0,024$ и $D = 0,027$ Вт/(м · К). По наклону графика № 2 найдено, что благодаря экранам теплопроводность пакета снизилась в 1,45 раза. Лучистая и кондуктивная компоненты теплопроводности оказались примерно равными. Значение кондуктивной практически совпало с теплопроводностью воздуха $D_a = 0,026$ Вт/(м · К). Видно, что вклад движения тепла по твёрдому веществу

мал. Поэтому материал можно рассматривать как воздух с включениями, препятствующими прохождению излучения.

Измерения со сжатием холста

Описанный метод измерения даёт хорошие результаты при толщине образца, сравнимой с глубиной проникновения излучения. Но даже самые лёгкие производимые нетканые объёмные холсты имеют много большую толщину, и подобные измерения в них невозможны, хотя и у них доля занятого твёрдым веществом объёма $\sim 1\%$. Есть основания полагать, что их кондуктивная составляющая теплопроводности тоже близка к теплопроводности воздуха. При не очень большом сжатии пористого волокнистого материала она практически не должна изменяться.

Глубина проникновения теплового излучения в первом приближении обратно пропорциональна плотности случайной рассеивающей структуры. Лучистая компонента теплопроводности должна быть пропорциональна толщине образца материала d :

$$L = \alpha d.$$

Тогда тепловая проводимость образца G пропорциональна его обратной толщине $1/d$:

$$G = R^{-1} = \alpha + D/d.$$

Для измерений (рис. 2) взяты холсты (1 – 9 табл. 1), состоящие из полиэфирных (полиэтилентерефталат, ПЭТ) волокон толщиной ~ 30 мкм с 15% добавкой шерстяных, бамбуковых, эвкалиптовых, хлопковых или льняных.

Таблица 1 / Table 1

Характеристики теплозащитных материалов / Characteristics of heat-shielding materials

№	Волокнистый состав	$D, 10^{-4}$, Вт/(м · К)	α , Вт/(м ² К)	M , г/м ²	δ	μ , г/м ²	d^* , мм	$L, 10^{-4}$, Вт/(м · К)	ρ^* , кг/м ³
1	ПЭТ + овечья шерсть	283	1,47	283	1,08	45,3	19,8	291	14,3
2	ПЭТ + овечья шерсть	279	1,41	312	1,06	47,9	18,4	259	17,0
3	ПЭТ + бамбуковые	292	1,18	330	1,11	42,4	17,9	211	18,4
4	ПЭТ + хлопковые	296	1,19	293	1,13	38,0	16,6	198	17,7
5	ПЭТ + бамбуковые	285	1,32	339	1,09	48,7	22,4	296	15,1
6	ПЭТ + шерсть яка	283	1,38	300	1,08	45,1	16,3	225	18,4
7	ПЭТ + льняные	285	1,51	340	1,09	55,9	18,7	282	18,2
8	ПЭТ + эвкалиптовые	289	1,33	349	1,10	50,5	18,6	247	18,8
9	ПЭТ	275	1,57	268	1,05	45,8	16,2	254	16,5

Источник: составлено авторами.

Рис. 2 / Fig. 2. Зависимости G (Вт/(м²К)) от обратной толщины $1/d$ (м⁻¹) холста / Dependencies of G (W/(m²K)) on the inverse thickness of $1/d$ (m⁻¹) of the canvas.

Источник: составлено авторами.

В табл. 1 собраны результаты измерений и характеристики образцов: поверхностная плотность M , толщина d^* при сжатии 100 Па, плотность ρ^* и лучистая теплопроводность L при этой толщине.

Обсуждение результатов измерений

Следует отметить, что наблюдается вполне удовлетворительное качественное и количественное соответствие экспериментальных результатов основным положениям предложенной физической модели. Полученные значения с хорошей точностью удовлетворяют предсказанной линейной зависимости. Кондуктивная составляющая теплопроводности материалов, ожидаемо, близка к теплопроводности воздуха.

Добавки дают разнонаправленный эффект. Благодаря толстым волокнам (в качестве которых использована овечья шерсть) материал лучше держит форму, но остаётся более прозрачным для излучения. Тонкие волокна (например, хлопок) уменьшают прозрачность, но материал легче деформируется. Однозначно положительный эффект от добавок слабо заметен. Разумно построенный материал должен иметь каркас из толстых волокон и непрозрачный наполнитель из тонких. Производители делать такой материал пока не научились. Однако заме-

тим, что такой природный материал существует. Это мех, содержащий толстый волос – ость и наполнитель – пух.

Для взаимного сравнения характеристики материалов сведены к показателям, не содержащим зависимости от толщины d и температуры T образца. Это кондуктивный показатель –

$$\delta = D(T_0) / D_a(T_0)$$

(для приведённых измерений $T_0 = 311$ К и $D_a = 0.026$ Вт/(м·К)) и радиационный показатель:

$$\mu = M\alpha(T_0) / (16\sigma T_0^3 / 3),$$

равный поверхностной плотности материала, эквивалентной глубине проникновения излучения. С их помощью при разной толщине d и температуре T можно рассчитать суммарную теплопроводность материала:

$$\lambda(d, T) = \delta D_a(T) + 16\sigma\mu T^3 d / (3M).$$

Заключение

Таким образом, разработаны методики измерений, определены критерии оценки и получены характеристики теплозащитных свойств лёгких утепляющих материалов. Продемонстрированы методы их сравнения. Определена роль случайной рассеивающей структуры как препятствия радиационной передаче тепла. Установлено, что при достаточно малой доле объёма, занятой твёрдым веществом, его участие в передаче тепла несущественно, а тепловая проводимость наполненной воздухом структуры пропорциональна её обратной толщине. Измерены показатели тепловой проницаемости ряда волокнистых материалов. Определено, как теплопроводность образца материала зависит от его температуры и толщины, до которой он сжат. Определены направления совершенствования теплозащитных свойств материалов. Продемонстрирован эффект от уменьшения лучистой составляющей теплопроводности. Доказано, что при создании ультралёгких утепляющих материалов приоритетное внимание должно быть уделено уменьшению радиационной компоненты в переносе тепла.

Статья поступила в редакцию 29.06.2021 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена; изд. 5-е перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
2. Doornink D. G., Hering R. G. Transient Combined Conductive and Radiative Heat Transfer // Journal of Heat Transfer. 1972. Vol. 94. Iss. 4. P. 473–478. DOI: 10.1115/1.3449970.
3. Moore T. J., Jones M. R. Analysis of the conduction–radiation problem in absorbing, emitting, non-gray planar media using an exact method // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 73. P. 804–809. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.029.

4. Шампаров Е. Ю. Исследование теплового переноса в полупрозрачной среде // Журнал технической физики. 2018. Т. 88. № 1. С. 134–140. DOI: 10.21883/JTF.2018.01.45497.2109.
5. Viskanta R., Grosh R. J. Heat transfer by simultaneous conduction and radiation in an absorbing medium // Journal of Heat Transfer. 1962. Vol. 84. Iss. 1. P. 63–72. DOI: 10.1115/1.3684294.
6. Шампаров Е. Ю., Жагрина И. Н. Установка для прецизионных бесконвекционных измерений тепловой проницаемости материалов при температурах, близких к комнатной. Патент на полезную модель № 166709 РФ 17.11.2016, заявл. 01.04.2016, опублик. 10.12.2016, бюл. № 34.

REFERENCES

1. Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena* [Basics of the theory of heat transfer]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 416 p.
2. Doornink D. G., Hering R. G. Transient Combined Conductive and Radiative Heat Transfer. In: *Journal of Heat Transfer*, 1972, vol. 94, iss. 4, pp. 473–478. DOI: 10.1115/1.3449970.
3. Moore T. J., Jones M. R. Analysis of the conduction–radiation problem in absorbing, emitting, non-gray planar media using an exact method. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 73, pp. 804–809. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.029.
4. Shamparov E. Yu. [Heat transfer in a semitransparent medium]. In: *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Technical Physics], 2018, vol. 88, no. 1, pp. 134–140. DOI: 10.21883/JTF.2018.01.45497.2109.
5. Viskanta R., Grosh R. J. Heat transfer by simultaneous conduction and radiation in an absorbing medium. In: *Journal of Heat Transfer*, 1962, vol. 84, iss. 1, pp. 63–72. DOI: 10.1115/1.3684294.
6. Shamparov E. Yu., Zhagrina I. N. Installation for precision non-convection measurements of the thermal permeability of materials at close to room temperature. Utility model patent No. 166709 RF 17.11.2016

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шампаров Евгений Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физики Российского государственного университета имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство);
e-mail: shamparov-eu@rguk.ru;

Бугримов Анатолий Львович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Российского государственного университета имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство);
e-mail: bugrimov-al@rguk.ru;

Родэ Сергей Витальевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики Российского государственного университета имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство);
e-mail: rode-s-v@mail.ru;

Жагрина Инна Николаевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения Российского государственного университета имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство);
e-mail: zhagrina-in@rguk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Eugene Yu. Shamparov – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Department of Physics, The Kosygin State University of Russia;
e-mail: shamparov-eu@rguk.ru;

Anatoly L. Bugrimov – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Departmental Head, Department of Physics, The Kosygin State University of Russia;
e-mail: bugrimov-al@rguk.ru;

Sergey V. Rode – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Department of Physics, The Kosygin State University of Russia;
e-mail: rode-s-v@mail.ru;

Inna N. Zhagrina – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Department of Material Science, The Kosygin State University of Russia;
e-mail: zhagrina-in@rguk.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Измерение показателей теплозащитных свойств случайной рассеивающей структуры / Шампаров Е. Ю., Бугримов А. Л., Родэ С. В., Жагрина И. Н. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2021. № 2. С. 52–60. DOI: 10.18384/2310-7251-2021-2-52-60

FOR CITATION

Shamparov E. Ju., Bugrimov A. L., Rode S. V., Jagrina I. N. Measurement of thermal protection property metrics of a random scattering structure. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2021, no. 2, pp. 52–60.
DOI: 10.18384/2310-7251-2021-2-52-60