УДК 538.931

DOI: 10.18384/2310-7251-2021-4-32-42

ИЗМЕРЕНИЕ ВКЛАДОВ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕДАЧИ В РАДИАЦИОННО-КОНДУКТИВНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛА В ВОЗДУХОПОЛНЕННЫХ СЛУЧАЙНО РАССЕИВАЮЩИХ СТРУКТУРАХ

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, стр. 1, Российская Федерация

Аннотация

Цель. Изучение взаимосвязи структуры и свойств материалов с их способностью различным образом передавать тепло.

Процедура и методы. Сопоставление теории и результатов практических измерений компонент теплопроводности случайной рассеивающей структуры с применением двух методов эксперимента и с модификацией радиационных свойств образцов.

Результаты. Описана методика измерения толщины радиационно-кондуктивной релаксации и температурного скачка в среде возле экрана излучения, а также радиационной и кондуктивной компонент и суммарной теплопроводности среды. Определён вид зависимости и измерены компоненты теплопроводности в широком диапазоне толщин при сжатии волокнистого холста, включая кондуктивные вклады, обусловленные движением тепла через воздух и по волокнам. Оценено изменение радиационного вклада в теплопроводность вследствие металлизации поверхности волокон.

Теоретическая и/или практическая значимость. Подтверждено, что разные способы измерения вкладов компонент теплопроводности материалов дают одинаковый результат. Определены условия минимума теплопроводности структуры в зависимости от её плотности. Продемонстрирован эффект от металлизации волокон на компоненты теплопроводности структуры.

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

MEASUREMENT OF CONTRIBUTIONS OF VARIOUS TRANSMISSION TYPES TO RADIATIVE-CONDUCTIVE HEAT TRANSFER IN AIR-FILLED RANDOMLY SCATTERING STRUCTURES

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

The Kosygin State University of Russia

33 build. 1 ulitsa Sadovnicheskaya, Moscow 117997, Russian Federation

Abstract

Aim. We study the relationship of the structure and properties of materials with their ability to transfer heat in various ways.

Methodology. The theory and the results of practical measurements of thermal conductivity components of a randomly scattering structure are compared using two experimental methods and the modification of the radiation properties of samples.

Results. The method for measuring the thickness of radiative-conductive relaxation and temperature jump in the medium near the radiation screen, as well as the radiant and conductive components and the total thermal conductivity of the medium, is described. The type of dependence is determined, and the components of thermal conductivity are measured in a wide range of thicknesses during compression of a fibrous canvas, including conductive contributions due to the movement of heat through the air and through the fibers. The change in the radiation contribution to the thermal conductivity due to the metallization of the fiber surface is estimated.

Research implications. It is confirmed that different methods for measuring the contributions of the thermal conductivity components of materials give the same result. The conditions of the minimum of the structure thermal conductivity depending on its density are determined. The effect of the metallization of fibers on the thermal conductivity components of the structure is demonstrated.

Keywords: radiant-conductive heat transfer, scattering random structure

Введение

Изучению известного явления диффузии теплового излучения как в отечественной [1], так и в зарубежной [2–5] теплофизике, уделяется пристальное внимание. Серьёзные трудности связаны с тем, что глубина проникновения теплового излучения в воздух [6; 7] очень велика по сравнению с размерами бытовых объектов, поэтому полагать излучение возле них диффузным неправильно. Однако есть целый класс материалов со случайно рассеивающей излучение структурой, в которых глубина проникновения излучения a невелика и диффузное приближение позволяет получить физически обоснованные результаты.

В работе [8] было показано, что вдали от границ (при большой оптической толщине) среды в соответствии с законом Эйнштейна для диффузии, когда градиент температуры достаточно мал

$$\nabla T \ll T/a, \quad (1)$$

процесс распространения тепла имеет линейный характер. Плотность радиационного потока переноса тепла Φ_L прямо пропорциональна градиенту температуры:

$$\Phi_L = -L\nabla T. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности L [1–5; 8] называют лучистой теплопроводностью среды:

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

где σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Выбранные в качестве объекта исследования вспененные и волокнистые материалы имеют случайную неоднородную структуру, не только поглощающую, но и эффективно рассеивающую излучение. Так как размер неоднородностей много больше длины волны излучения, то глубина проникновения для всех длин волн примерно одинакова. В окружающих нас условиях температура образца T , как правило, много больше приложенной к нему разности температур. Поэтому при характерной для исследуемых материалов глубине проникновения $a \sim 1$ мм условие (1) обычно выполняется с высокой точностью.

Следует отметить, что при радиационной передаче тепла глубина проникновения излучения играет ту же роль, что и длина свободного пробега молекул при кондуктивной передаче. Оба процесса описываются одинаковыми уравнениями. В обоих случаях случайную неоднородную среду можно характеризовать средним значением теплопроводности, когда размеры образца много больше размеров неоднородностей. В такой среде при радиационно-кондуктивном переносе тепла вдали от границ выполняется уравнение Фурье в обобщённой форме:

$$\Phi = -\lambda \nabla T_{\infty}. \quad (4)$$

Суммарная теплопроводность среды λ складывается из радиационной L и кондуктивной D компонент:

$$\lambda = D + L. \quad (5)$$

В работе [8] аналитически была решена задача о стационарном радиационно-кондуктивном переносе тепла в серой среде возле плоской непрозрачной поверхности. При постоянной перпендикулярной поверхности плотности потока тепла Φ зависимость температуры среды от расстояния x до границы имеет вид:

$$T = T_0 + x \nabla T_{\infty} + \tau \cdot \exp(-x/b), \quad (6)$$

где b – глубина радиационно-кондуктивной релаксации, а τ – приповерхностный скачок температуры,

$$b = a / \gamma, \quad (7)$$

$$\gamma^2 = \lambda / D. \quad (8)$$

При полностью отражающей поверхности:

$$\tau = -a \Phi (\gamma^2 - 1) / (\lambda \gamma). \quad (9)$$

Удалённую поверхность характеризует вносимое ею дополнительное тепловое сопротивление:

$$R_{\infty} = \tau / \Phi. \quad (10)$$

Измерения с экраном излучения

В качестве объекта исследований для измерений был взят пласт вспененного полиэтилена толщиной 0,75 мм, из которого по размерам (85×85 мм²) рабочей

части установки [9] вырезаны образцы. Вес каждого образца 177 мг. Плотность $32,6 \text{ кг/м}^3$. Доля занятого полиэтиленом пространства 3,3%.

Установка, с помощью которой сделаны измерения, собрана так, чтобы практически полностью исключить конвективную передачу тепла. Для этого горизонтальный нагреватель помещён строго над холодильником. В контролируемый по толщине зазор между ними помещаем стопку образцов. Чтобы направить все выделяемое электрическим током в нагревателе тепло через образцы к холодильнику, с обратной стороны за нагревателем сделан тепловой экран. При измерении задавалась и стабилизировалась температура экрана, находилось такое подаваемое на нагреватель напряжение, при котором температура нагревателя не изменялась и была равна температуре экрана. При этом поток тепла от нагревателя к экрану мал сразу по двум причинам. Во-первых, из-за хорошей тепловой изоляции между ними, во-вторых, из-за того, что разность их температур мала. Поток тепла от нагревателя к холодильнику получался с достаточной степени точности стационарным. Плотность потока практически одинакова во всём рабочем объёме установки.

Длительность каждого измерения определялась, в частности, и временем релаксации температуры образца. На отдельное измерение уходило обычно от 10 минут до получаса. При достаточной длительности и тщательности с помощью установки вполне достижима точность измерений $\sim 1\%$.

На рис. 1 представлены две зависимости теплового сопротивления R от толщины среды d (числа слоёв вспененного полиэтилена), отличающиеся тем, что во втором случае посередине стопки помещён экран из алюминиевой фольги.

Для первой зависимости $R_1(d)$ данные с хорошей точностью аппроксимируются ожидаемой прямой линией (4). По наклону прямой

$$dR_1 / dd = \lambda^{-1} \quad (11)$$

была рассчитана суммарная теплопроводность вспененного полиэтилена $\lambda = 0,0483 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Теоретически предсказываемый вид второй зависимости (6):

$$R_2 = d / \lambda + 2R_\infty \left(1 - \exp(-d / (2b)) \right). \quad (12)$$

Поэтому данные второй зависимости были преобразованы к виду:

$$A = R_2 - d / \lambda. \quad (13)$$

Посредством аппроксимации (рис. 1(а)) кривой вида:

$$A = 2R_\infty \left(1 - \exp(-d / (2b)) \right) \quad (14)$$

были найдены тепловое сопротивление удалённой поверхности $R_\infty = 0,0053 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ и толщина радиационно-кондуктивной релаксации $b = 0,97 \text{ мм}$. Так как (7) – (10)

$$L / D = \gamma^2 - 1 = R_\infty \lambda / b, \quad (15)$$

то полученные значения позволили рассчитать радиационную $L = 0,0101$ и кондуктивную $D = 0,0382$ Вт/(м · К) компоненты теплопроводности вспененного полиэтилена, а также $\gamma = 1,124$ и глубину проникновения теплового излучения – $a = 1,09$ мм. Точность измерений проверена по формуле (3) при средней температуре наших измерений $T = 312$ К. Тогда $L' = 0,0100$ Вт/(м · К). Сравнительно невысокая (~4%) точность измерения компонент теплопроводности обусловлена малой глубиной проникновения излучения, лишь в 1,5 раза большей толщины слоя материала. Тем не менее, нам удалось непосредственно наблюдать тепловое сопротивление удалённой поверхности и глубину радиационно-кондуктивной релаксации и оценить вклад каждой из компонент теплопроводности. Теоретические обоснования и результаты практических измерений показали глубокое согласие.

Рис. 1 / Fig. 1. Зависимости теплового сопротивления R от толщины d : 1 – стопок образцов вспененного полиэтилена и аппроксимирующая прямая $R = d/\lambda$, 2 – таких же стопок с алюминиевой фольгой посередине. На вставке (a) – зависимость $A(d)$ и аппроксимирующая кривая. / Thermal resistance R depending on the stack thickness d : 1 – for the stacks of samples of foamed polyethylene and the approximating straight line; 2 – for the same stacks with aluminum foil in the middle. On the insert (a) there is dependency $A(d)$ and the approximating curve.

Источник: по данным авторов.

Кондуктивная теплопроводность массивного полиэтилена $0,4$ Вт/(м · К) во много раз больше теплопроводности воздуха при температуре измерений, равной $D_A = 0,026$ Вт/(м · К). Полиэтилен занимает $1/30$ часть объёма, поэтому

можно полагать, что вклад в кондуктивную теплопроводность материала, обусловленный движением тепла по полиэтилену, примерно в те же 30 раз меньше теплопроводности массивного полиэтилена. Соответственно, кондуктивная составляющая теплопроводности материала $D = 0,038$ сложена из долей, обусловленных движением тепла через воздух $D_A = 0,026$ и движением по полиэтилену $D_S = 0,012$ Вт/(м · К):

$$D = D_A + D_S. \quad (16)$$

Измерения со сжатием волокнистого холста

Вторая часть работы посвящена изучению трансформации вклада каждой из компонент теплопроводности при изменении плотности среды.

Для измерений было взято объёмное нетканое полотно с поверхностной плотностью 70 г/м^2 , выпускаемое под маркой «холлофайбер» (в мире больше известен его близкий аналог, выпускаемый под маркой «тинсулейт»). Полотно состоит из полых термически спаянных лавсановых (полиэтилентерефталатных [10]) волокон толщиной ~ 30 мкм. Это самый тонкий вариант из выпускаемых в настоящее время полотен. Для второй серии измерений на полотно с обеих сторон посредством вакуумного термического распыления был нанесён алюминий с фронтальной толщиной слоя ~ 100 нм. Наши оценки показали, что глубина проникновения теплового излучения в такое полотно чуть больше половины его толщины. Распылённый металл должен проникать в полотно примерно на такую же глубину. Поэтому можно полагать, что алюминиевая металлизация нанесена достаточно равномерно по всей толщине материала.

Для обоих видов материала измерены зависимости суммарной теплопроводности λ материала от толщины d , до которой он сжат (рис. 2). Образцы сложены в два слоя с общей начальной толщиной 20 мм и весом 998 мг. Доля занятого полиэтилентерефталатом объёма при этом равна 0,5%.

При увеличении толщины материала радиационная компонента теплопроводности растёт, доля кондуктивной компоненты, обусловленная движением тепла по воздуху, практически постоянна и вклад, обусловленный движением тепла по твёрдому веществу, уменьшается обратно пропорционально толщине:

$$D = D_A + k_1 / d. \quad (17)$$

Радиационная компонента растёт, в первую очередь, прямо пропорционально толщине вследствие уменьшения оптической плотности среды, помимо этого, есть добавка, обусловленная изменением расположения волокон:

$$L = k_2 d - k_3 d^{3/2}. \quad (18)$$

Обе экспериментально полученные зависимости были аппроксимированы кривыми вида:

$$\lambda = 0,026 + k_1 / d + k_2 d - k_3 d^{3/2}. \quad (19)$$

Рис. 2 / Fig. 2. Зависимости суммарной теплопроводности «холлофайбера» λ от толщины d , до которой он сжат, и аппроксимирующие кривые: 1 – без металлизации и 2 – с металлизацией / Dependences of the total thermal conductivity of the “hollowfiber” λ on the thickness d to which it is compressed, and the approximating curves: 1 – without metallization and 2 – with metallization.

Источник: по данным авторов.

Обсуждение результатов измерений

Совпадение результатов с физически осмысленными предсказаниями вполне удовлетворительно. Найденные коэффициенты для первой зависимости – $k_{11} = 0,030$, $k_{21} = 0,00465$, $k_{31} = 0,00054$ и для второй зависимости – $k_{12} = 0,025$, $k_{22} = 0,00438$, $k_{32} = 0,00054$ позволили оценить вклад каждой из компонент теплопроводности.

При $d \approx 3$ мм суммарная теплопроводность обеих модификаций минимальна, $\lambda_{1\min} = 0,0474$ и $\lambda_{2\min} = 0,0449$ Вт/(м · К). При этом вклад, обусловленный движением тепла по пластику, в обоих случаях около $D_s = 0,009$ Вт/(м · К), а радиационная компонента теплопроводности – $L_1 = 0,012$ и $L_2 = 0,010$ Вт/(м · К). Следует отметить, что при толщине «холлофайбера» 3 мм доля занятого твёрдым веществом объёма составляет те же 3,3%, что и у вспененного полиэтилена. Нетрудно заметить, что вклад каждой из компонент в теплопроводность того и другого материала тоже примерно одинаковый. Тот факт, что два по сути различных метода измерений дают сходные результаты, является весомым подтверждением правильности наших представлений.

Ничтожно малый по толщине слой металла кондуктивную теплопроводность материала практически не увеличил. Однако, несмотря на то, что среднее рас-

стояние между волокнами (250 мкм при $d = 10$ мм) достаточно велико по сравнению с длиной волны излучения, радиационная компонента теплопроводности уменьшилась значительно. При толщине простого и металлизированного «холлофайбера» 7,5 мм она составила соответственно 0,024 и 0,021 Вт/(м · К), при 20 мм – 0,045 и 0,040 Вт/(м · К). При увеличении толщины материала эффект от металлизации по абсолютной величине растёт. Но относительное снижение радиационной компоненты теплопроводности уменьшается и при $d = 3, 7,5$ и 20 мм составляет 15, 12 и 11%. Поведение металлизированного материала при сжатии похоже на поведение пропускания излучения металлической решеткой, когда длина волны значительно больше и приближается к размеру ячейки. При приближении расстояния между волокнами к длине волны излучения радиационная компонента теплопроводности металлизированного материала должна резко снижаться.

Заключение

Металлизированное объёмное волокнистое полотно – это материал будущего. При одинаковом расстоянии между волокнами и, соответственно, примерно при той же лучистой теплопроводности плотность материала пропорциональна квадрату толщины волокон. Металлизация материалов с очень тонкими волокнами – это путь получения ультралёгких утепляющих материалов. В массовом производстве такие материалы пока слишком дороги, но в продуктах высоких технологий – в крио- или в космической технике целесообразность их использования вполне очевидна.

Таким образом, представлены две показавшие качественное и количественное согласие методики и проведены практические измерения компонент теплопроводности вспененного и волокнистого утепляющего материала. Установлен характер зависимости каждой из компонент от плотности среды. Описан вклад радиационной компоненты в перенос тепла и предложены способы её снижения. Предложен один из вариантов построения ультралёгких утепляющих материалов. Измерения радиационно-кондуктивного переноса тепла уникальны по информативности и крайне перспективны для исследования и понимания свойств материалов со сложной структурой, близкой к хаотической.

Статья поступила в редакцию 28.09.2021 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена; изд. 5-е перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
2. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением / пер. с англ. М.: Мир, 1975. 934 с.
3. 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.
4. 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.

5. 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.
6. Кондратьев К. Я. Перенос длинноволнового излучения в атмосфере. М., Л.: Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1950. 287 с.
7. Cormier J. G., Ciurylo R., Drummond J. R. Cavity ringdown spectroscopy measurements of the infrared water vapor continuum // *Journal of Chemical Physics*. 2002. Vol. 116. Iss. 3. P. 1030–1034. DOI: 10.1063/1.1425825.
8. Шампаров Е. Ю. Тепловой перенос в полупрозрачной среде // *Журнал технической физики*. 2018. Т. 88. № 1. С. 133–140. DOI: 10.21883/JTF.2018.01.45497.2109.
9. 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 // *Изобретения. Полезные модели: официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент)*. 2016. № 34 [Электронный ресурс]. URL: https://www1.fips.ru/Archive/PAT/2016FULL/2016.12.10/INDEX_RU.HTM (дата обращения: 12.06.2021).
10. Ward I. M. The molecular structure and mechanical properties of polyethyleneterephthalate fibers // *Textile Research Journal*. 1961. Vol. 31. Iss. 7. P. 650–664. DOI: 10.1177/004051756103100711.

REFERENCES

1. Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena* [Basics of the theory of heat transfer]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 416 p.
2. Siegel R., Howell J. *Teploobmen izlucheniem* [Thermal radiation heat transfer]. Moscow, Mir Publ., 1975. 934 p.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Kondrat'ev K. Ya. *Perenos dlinnovolnovo izlucheniya v atmosphere* [Long-wave radiation transport in the atmosphere]. Moscow, Leningrad, State publishing house of technical and theoretical literature, 1950. 287 p.
7. Cormier J. G., Ciurylo R., Drummond J. R. Cavity ringdown spectroscopy measurements of the infrared water vapor continuum. In: *Journal of Chemical Physics*, 2002, vol. 116, iss. 3, pp. 1030–1034. DOI: 10.1063/1.1425825.
8. Shamparov E. Yu. [Heat transfer in a semitransparent medium]. In: *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Technical Physics], 2018, vol. 88, no. 1, pp. 133–140. DOI: 10.21883/JTF.2018.01.45497.2109.
9. Shamparov E. Yu., Zhagrina I. N. [Installation for precision non-convection measurements of thermal permeability of materials at temperatures close to room temperature. Utility model patent No. 166709 RF 17.11.2016, Appl. 01.04.2016]. In: *Izobreteniya. Poleznye modeli: ofitsial'nyi byulleten' Federal'noi sluzhby po intellektual'noi sobstvennosti (Rospatent)*

[Inventions. Utility Models: Official Bulletin of the Federal Service for Intellectual Property (Rospatent)], 2016, no. 34. Available at: https://www1.fips.ru/Archive/PAT/2016FULL/2016.12.10/INDEX_RU.HTM (accessed: 12.06.2021).

10. Ward I. M. The molecular structure and mechanical properties of polyethyleneterephthalate fibers. In: *Textile Research Journal*, 1961, vol. 31, iss. 7, pp. 650–664. DOI: 10.1177/004051756103100711.

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, Kosygin State University of Russia;

e-mail: zhagrina-in@rguk.ru.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Шампаров Е. Ю., Бугримов А. Л., Родэ С. В., Жагрина И. Н. Измерение вкладов различных механизмов передачи в радиационно-кондуктивный перенос тепла в воздушнонаполненных случайно рассеивающих структурах // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2021. № 4. С. 32-42.

DOI: 10.18384/2310-7251-2021-4-32-42

FOR CITATION

Shamparov E. Ju., Bugrimov A. L., Rode S. V., Zhagrina I. N. Measurement of contributions of various transmission types to radiative-conductive heat transfer in air-filled randomly scattering structures. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics-Mathematics*, 2021, no. 4, pp. 32-42.

DOI: 10.18384/2310-7251-2021-4-32-42