

УДК 66.017

*Н.Н. Воробьев¹, Д.Я. Баринов¹, А.В. Зуев¹, С.И. Пахомкин¹***РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-95-102

Дана оценка влияния пористости на эффективную теплопроводность теплоизоляционных материалов. Рассмотрены основные факторы, оказывающие влияние на теплопроводность материала, такие как плотность, вид пористой структуры материала и влажность. Описана методика проведения измерения теплопроводности методами стационарного теплового потока и горячей охранной зоны. Приведена методика расчета эффективной теплопроводности волокнистых материалов. Проведены расчетно-экспериментальное исследование эффективной теплопроводности и анализ полученных результатов.

Ключевые слова: теплоизоляционные материалы, волокнистые материалы, пористость, теплопроводность, теплопередача, тепловой поток.

*N.N. Vorobev¹, D.Ya. Barinov¹, A.V. Zuev¹, S.I. Pakhomkin¹***COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY OF FIBROUS MATERIALS**

The article is devoted to the evaluation of the effect of porosity on the effective thermal conductivity of thermal insulation materials. The main factors influencing the thermal conductivity of the material, such as density, the type of porous structure of the material and humidity, are considered. The method of measuring the thermal conductivity by the stationary heat flow method and the hot zone method is described. A method for calculating the effective thermal conductivity of fibrous materials is presented. A computational and experimental study of the effective thermal conductivity is carried out and the results are analyzed.

Keywords: thermal insulation materials, fibrous materials, porosity, thermal conductivity, heat transfer, heat flow.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Одним из актуальных направлений развития авиационной промышленности является разработка конструкций из композиционных материалов, в связи с чем к ним предъявляются все более жесткие требования. Они должны обладать повышенной термостойкостью, высокими звукоизоляционными, механическими характеристиками и хорошими теплофизическими свойствами [1]. Перед разработчиками стоит ряд научно-технических задач, требующих решения, таких как уменьшение материалоемкости продукции, энергосбережение, рациональное использование ресурсов и др. [2–4]. Одно из актуальных для разработчиков материалов направлений – создание теплоизоляционного материала с пониженной плотностью, высокими эксплуатационными свойствами, отвечающего требованиям пожарной безопасности. Композиционные, в том числе

теплоизоляционные, материалы широко применяются в строительстве, авиации, автомобилестроении, энергетике и др. [5–8]. Одним из основных требований к теплоизоляционным материалам для авиакосмической промышленности, машиностроения, энергетике и других отраслей является их низкая теплопроводность.

Теплопроводность в волокнистых материалах состоит из трех составляющих – кондуктивного переноса тепла, излучения и конвекции. Перенос тепла по волокнам осуществляется путем кондуктивной теплопроводности за счет колебаний атомов в кристаллической решетке. Поскольку кристаллическая решетка обладает прочными связями, конвективный перенос тепла невозможен и происходит только с помощью теплопроводности (фононная теплопроводность). В жидкостях и газах, заполняющих пространство между волокнами, перенос тепла осуществляется за счет теплового движения молекул и посредством перемещения макроскопических объемов жидкости, а также конвекцией и теплопроводностью. Лучистый теплообмен в волокнистых теплоизоляционных материалах определяется степенью черноты твердых материалов, усредненным расстоянием между волокнами, излучательной и поглощающей способностью газа наполнителя. Доля общего потока тепла, приходящаяся на каждую из составляющих, зависит от совокупности определяющих параметров: теплопроводности волокон и газа, диаметра волокон, их ориентации, степени черноты и т. д. Для оценки эффективной теплопроводности материалов необходимо изучить вклад каждой из составляющих общего теплового потока в материале.

Из всех доступных и широко распространенных веществ воздух обладает наименьшей теплопроводностью, поэтому основная идея получения эффективного теплоизоляционного материала состоит в предельном насыщении материала порами, заполненными воздухом. Для материалов, отвечающих требованиям теплоизоляции, характерны малая объемная плотность ($10 < \rho < 150 \text{ кг/м}^3$) и высокая пористость ($60 < m < 95 \%$) [9]. Исследования теплофизических свойств теплоизоляционных материалов, приведенные в работах [10, 11], показали, что с увеличением плотности возрастает эффективный коэффициент теплопроводности. При повышении межволоконистой пористости увеличивается вклад в общую теплопроводность конвективной составляющей. Особенно заметен вклад в конвективную теплопроводность при повышенных температурах. С ростом температуры от 0 до 500 °С передача тепла через поры диаметром 1 и 6 мм увеличивается соответственно в 5,3 и 11,7 раза [12]. В порах диаметром <5 мм влияние конвекции наступает при разности температур в 100 °С, а в порах диаметром >10 мм – при разности температур в 2 °С [9]. Поэтому для теплоизоляционных материалов предпочтительнее мелкопористое строение с замкнутыми порами. Далее приведена количественная зависимость теплопроводности воздуха от размера пор при температуре 10 °С [12]:

Средний размер пор, мм	0,1	1	2	4	5	8	10
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,026	0,029	0,038	0,041	0,044	0,053	0,063

Теплоизоляционные показатели зависят как от объема воздуха, заключенного в порах материала, так и от его равномерного распределения. В местах с повышенным содержанием твердой фазы образуются так называемые «мостики холода» – зоны повышенной теплопередачи [12]. Наличие так называемых температурных мостов приводит к снижению эффективности теплоизоляционного материала и является причиной образования конденсата.

Большое влияние на эффективную теплопроводность материала оказывают диаметр и ориентация волокна теплоизоляционного материала. Теплопроводность материала с волокнами, ориентированными параллельно тепловому потоку, больше, чем у материала с волокнами, ориентированными перпендикулярно тепловому потоку, – в 1,4 раза в воздухе и в 2 раза в вакууме [13]. При изготовлении волокнистого материала оптимальной структуры необходимо получать волокна круглого равномерного сечения с гладкой поверхностью и минимальным диаметром. Уменьшение диаметра волокон приводит к увеличению термического сопротивления материала за счет уменьшения площади контактов между волокнами. В области, примыкающей к месту контакта, происходит интенсивное взаимодействие фононов друг с другом, что вызывает дополнительное термическое сопротивление. Кроме того, уменьшение диаметра волокна приводит к увеличению прочности при разрыве, так как толстые волокна обладают повышенной хрупкостью. Теплоизоляционный материал, изготовленный из более тонких волокон, имеет лучшие теплофизические и упругие свойства, обладает меньшей средней плотностью, бóльшими упругостью и прочностью при изгибе.

Для волокнистых теплоизоляционных материалов характерна открытая пористость, что приводит к их необратимому увлажнению при недостаточной защите от воздействия воды и влаги. Увлажнение материала в свою очередь приводит к резкому увеличению его теплопроводности, что вызывает ухудшение эксплуатационных характеристик материала. Свободная вода в его составе отрицательно влияет на прочностные характеристики, морозостойкость и теплоизоляционные свойства материала [14]. Так, теплопроводность для сухого кирпича $\lambda = 0,35$ Вт/(м·К), для воды $\lambda = 0,60$ Вт/(м·К), а для влажного кирпича $\lambda = 1$ Вт/(м·К). В данном случае увеличение теплопроводности кирпича при его увлажнении можно объяснить ростом конвективного переноса тепла за счет капиллярного движения воды в порах материала. Кроме того, абсорбционно связанная влага имеет другие характеристики по сравнению со свободной водой.

Перенос тепла в волокнистых материалах изучается с конца XIX в. и до настоящего времени. Вопросу исследования теплофизических характеристик пористых материалов посвящено большое количество работ: Д.Л. Тимрота [15], Б.Н. Кауфмана [16], А.Ф. Чудновского [17] и ряда других авторов. Во многих работах также представлено экспериментальное определение теплопроводности. Производились попытки построения зависимостей, связывающих эффективную теплопроводность волокнистого материала с диаметром волокон, плотностью, весовой и объемной концентрацией материала. Эмпирические зависимости, полученные обобщением экспериментальных данных, позволяют оценить эффективную теплопроводность конкретного исследуемого материала. Подобные формулы предложил Б.Н. Кауфман:

– для минеральной ваты:

$$\lambda = 4,7 \cdot 10^{-2} + 5,5 \cdot 10^{-2} \cdot (\rho - 0,15) + 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot (n - 10) + 5,5 \cdot 10^{-4} \cdot (d - 3); \quad (1)$$

– для стекловаты:

$$\lambda = 4,3 \cdot 10^{-2} + 6 \cdot 10^{-2} \cdot (\rho - 0,15) + 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot (d - 3), \quad (2)$$

где λ – теплопроводность материала, ккал/(м·ч·°С); ρ – плотность, г/см³; n – концентрация, % (по массе); d – диаметр волокна, мкм.

Следует отметить, что в данных формулах не учитываются теплопроводность компонентов и степень черноты поверхности волокон.

Стремление к более детальному анализу расчета теплопроводности в материалах с хаотическим расположением волокон привело к разработке упрощенных математических моделей [18–21]. Одна из таких простейших моделей представлена в виде чередующихся слоев волокон и воздуха, ориентированных продольно и перпендикулярно потоку тепла. Эффективную теплопроводность данной модели можно представить формулой

$$\lambda = \alpha_{\parallel} [\lambda_1(1 - m_2) + \lambda_2 \cdot m_2] + \frac{\alpha_{\perp}}{\frac{1 - m_2}{\lambda_1} + \frac{m_2}{\lambda_2}}, \quad (3)$$

где α_{\parallel} и α_{\perp} – характеристика объемной концентрации волокон, ориентированных продольно и перпендикулярно потоку тепла ($\alpha_{\parallel} = 1/3$; $\alpha_{\perp} = 2/3$).

Перенос тепла в такой модели осуществляется только за счет теплопроводности материала. Моделирование теплопроводности подобным образом не учитывает формы волокон и пор, характер их пространственного распределения и изохронность такого материала.

Материалы и методы

В данной работе для расчета эффективного коэффициента теплопроводности выбрана методика, приведенная в методике МДС 41-7.2004 [22], которая разработана в ОАО «Теплопроект» и предназначена для оценки влияния влажности на теплозащитные свойства теплоизоляции. В ней содержатся предложения по нормированию расчетных значений по теплопроводности в конструкциях. Методика также позволяет при отсутствии экспериментальных данных оценивать значения теплопроводности для случая ориентирования волокон перпендикулярно относительно теплового потока.

Как отмечено ранее, эффективная теплопроводность является обобщенной характеристикой кондуктивного, радиационного и конвективного переноса тепла:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_q + \lambda_p + \lambda_k, \quad (4)$$

где λ_q – кондуктивный коэффициент теплопроводности; λ_p – радиационный коэффициент теплопроводности; λ_k – конвективный коэффициент теплопроводности.

Вклад перечисленных составляющих в суммарном переносе тепла зависит от множества факторов, в том числе от химического состава материала, его структуры, состава и давления газовой среды, в которой используется материал.

Теплопроводность базальтового волокна λ_b при заданной температуре находят по справочной научной литературе либо рассчитывают по формуле

$$\lambda_b = 0,857 + \frac{T}{875}. \quad (5)$$

Пористость волокнистого материала рассчитывают по формуле

$$\Pi = 1 - \frac{\rho_{\text{каж}}}{\rho_b}. \quad (6)$$

При этом плотность для базальтового волокна ρ_b принимают равной 2830 кг/м³.

Средний размер пор определяют по формуле

$$L_{\text{пор}} = \left(\frac{\Pi}{1} - \Pi \right) \cdot L_b, \quad (7)$$

где размер волокна $L_b = \frac{\pi d^2}{4}$.

Радиационную теплопроводность рассчитывают по соотношению

$$\lambda_p = \frac{\sigma \cdot T^3}{k_{\text{осл}}} \cdot \frac{\pi d}{4(1 - \Pi)}, \quad (8)$$

где $k_{\text{осл}} = 70\pi d T + 5000(1 - \Pi)^2 T^{-1}$ – коэффициент ослабления.

При $d > 20$ мкм коэффициент ослабления $k_{осл}$ принимают равным 0,8.

Для расчета переноса тепла по волокнам пористого материала применяют формулы

$$\lambda_q = \frac{1}{\frac{(1-a)}{\lambda_1} + \frac{a}{\lambda_2}}, \quad (9)$$

$$\lambda_1 = (1-T)\lambda_{ск} + \Pi\lambda_r, \quad (10)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{\frac{(1-\Pi)}{\lambda_{ск}} + \frac{\Pi}{\lambda_r}}, \quad (11)$$

где $\lambda_{ск}$ – теплопроводность каркаса материала; λ_r – теплопроводность газа-наполнителя материала; a – коэффициент, характеризующий структуру материала (для базальтового волокна равный 0,7).

Относительный коэффициент конвективной теплопроводности описывается уравнением

$$E_k = \frac{\lambda_q + \lambda_p + \lambda_k}{\lambda_q + \lambda_p}. \quad (12)$$

Зависимость относительного коэффициента конвективной теплопроводности от числа Рэлея для плоского теплоизоляционного слоя имеет вид

$$E_k = (Ra)^{0,05} \quad (13)$$

при вычислении числа Рэлея по формуле

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot L \cdot K \cdot \rho^2 \cdot c_p \cdot \Delta T}{\mu(\lambda_q + \lambda_p) 2,78 \cdot 10^{-4}}, \quad (14)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ – плотность, кг/м³; c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); β – температурный коэффициент линейного расширения, К⁻¹; ΔT – перепад температур, °С; L – толщина слоя изоляции, м.

При значении $Ra \leq 40$ величина $E_k = 1$ – конвективный перенос отсутствует, т. е. $\lambda_k = 0$.

Коэффициент фильтрационной проницаемости рассчитывают по соотношению

$$K = \frac{\Pi^3}{4 \left[\frac{4(1-\Pi - \frac{n}{100})}{d} \right]^2}, \quad (15)$$

где n – содержание неволокнистых включений, %.

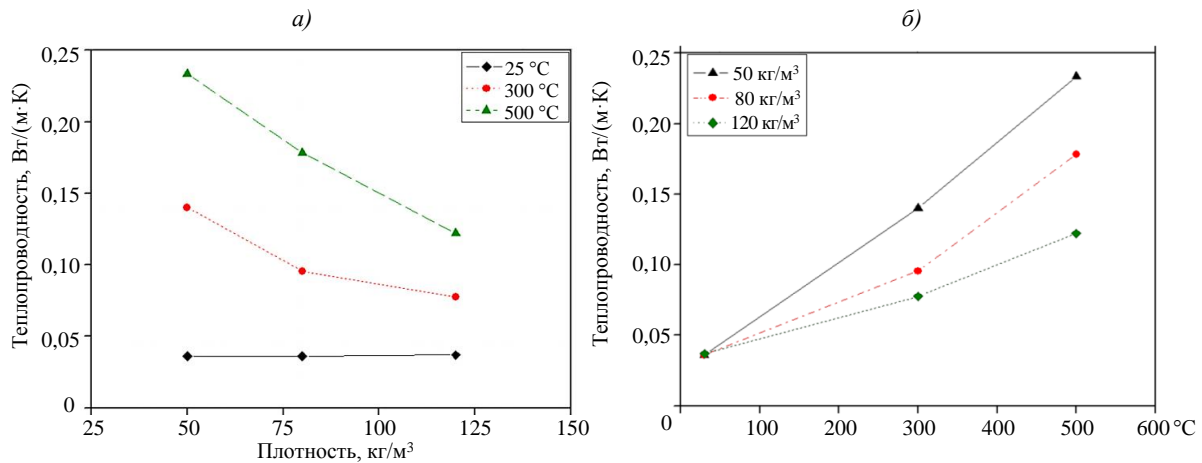
Основным объектом исследования в данной статье является волокнистая теплоизоляция на основе базальтового волокна с плотностью 50; 80 и 120 кг/м³, диаметром волокна 11 мкм и пористостью 89; 91 и 92 %. Измерение теплопроводности при температуре 25 °С проводили на установке НФМ 436 фирмы Netzsch стационарным методом. Данный прибор применяется для измерения теплопроводности низко-теплопроводных материалов. Калибровали прибор в соответствии с методом, изложенным в ГОСТ 7076–99.

Для испытаний изготавливали образцы в виде прямоугольного параллелепипеда с линейными размерами 300×300×20 мм. Образец помещали в прибор между двумя горизонтальными пластинами: верхняя пластина – горячая, нижняя – холодная. В ходе эксперимента температуру верхней и нижней пластин поддерживали постоянной, в результате через образец проходил одномерный тепловой поток между нагреваемой и охлаждаемой сторонами. Тепловой поток, проходящий через образец, измеряли двумя калиброванными датчиками теплового потока. После достижения теплового равновесия измерение заканчивали.

Для измерения коэффициента теплопроводности при температурах 300 и 500 °С использовали прибор, основанный на методе горячей охранной зоны марки GHP 456 Titan фирмы Netzsch. Метод горячей охранной зоны признан наиболее точным стационарным методом для измерения теплопроводности [23, 24]. В исследуемых образцах создается одномерный тепловой поток, при этом тепловые утечки от образцов и нагревателя компенсируются нагреваемой пластиной. Кроме того, в измерительной ячейке прибора контролируются состав и давление газовой среды, что позволяет исследовать ее влияние на теплопроводность в материале.

Результаты и обсуждение

В данной работе измерение теплопроводности проводили стационарным методом при горизонтальном расположении нагревателя и холодильника на приборе марки НФМ 436 для измерения теплопроводности теплоизоляционных материалов и методом горячей охранной зоны на приборе марки GHP 456 Titan по трем образцам базальтовой теплоизоляции с плотностью 50; 80 и 120 кг/м³. Разность температур лицевых граней образцов составляла 20 °С (при измерении теплопроводности при 25 °С температура нижней/верхней грани образца составляла соответственно 15/35 °С). Результаты измерения теплопроводности теплоизоляционного материала на основе базальтового волокна представлены на рисунке.



Зависимости теплопроводности базальтового теплоизоляционного материала от плотности (а) и температуры (б)

Для расчета теплопроводности базальтового теплоизоляционного материала задавали плотность, теплопроводность и диаметр базальтового волокна, а также теплофизические свойства газа-наполнителя, такие как плотность, динамическая вязкость, теплоемкость и теплопроводность. Результаты, полученные при эксперименте, приведены в таблице.

Зависимость между размером пор и теплопроводностью воздуха при температуре 10 °С

Температура испытания, °С	Теплопроводность воздуха, Вт/(м·К), при плотности базальтового теплоизоляционного материала, кг/м ³					
	50		80		120	
	Экспери- мент	Расчет	Экспери- мент	Расчет	Экспери- мент	Расчет
25	0,036	0,043	0,036	0,042	0,037	0,041
300	0,140	0,132	0,096	0,082	0,078	0,068
500	0,233	0,156	0,178	0,156	0,122	0,104

Как видно из графиков, представленных на рисунке, увеличение плотности приводит к уменьшению эффективной теплопроводности материала. Основной вклад в перенос тепла вносит кондуктивная теплопроводность. Уменьшение плотности, а следовательно, повышение пористости, приводит к увеличению доли молекулярной составляющей переноса тепла, вместе с тем кондуктивная составляющая теплопроводности монотонно снижается. При повышении температуры теплопроводность материала монотонно увеличивается, при этом при температуре 25 °С плотность материала практически не оказывает никакого влияния на теплопроводность. Расчет по методике, описанной в МДС 41-7.2004 [22], дает удовлетворительное согласование с экспериментальными данными (см. таблицу).

Заключения

В данной статье рассмотрены основные факторы, влияющие на теплопроводность теплоизоляционных материалов, проведен анализ научно-технической литературы, посвященный математическому моделированию теплопереноса в пористых и волокнистых материалах.

Измерение эффективной теплопроводности проводили стационарным методом и методом горячей охранной зоны. Данные методы обеспечивают большую точность и достоверность при определении теплопроводности материала, погрешность измерения составила $\pm 3\%$. Построены зависимости теплопроводности базальтового теплоизоляционного материала от плотности и температуры.

Описана методика расчета эффективной теплопроводности волокнистых материалов с ориентацией волокон, направленных перпендикулярно тепловому потоку. Расчет по предложенной методике дает удовлетворительное согласование с экспериментальными данными. В настоящее время отсутствуют математические модели, с помощью которых можно с достаточной точностью вычислить теплопроводность материала. Из-за хаотического расположения волокон в материале необходимо большое количество поправок и допущений, связанных с геометрическими размерами пор.

Библиографический список

1. Варрик Н.М. Термостойкие волокна и тепловозвукоизоляционные огнезащитные материалы // Труды ВИАМ. 2014. № 6. Ст. 07. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 17.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-7-7.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
3. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
4. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.

5. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
6. Аристова Е.Ю., Денисова В.А., Дрожжин В.С. и др. Композиционные материалы с использованием полых микросфер // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.
7. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петров Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
8. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
9. Тихонов В.Б., Колесниченко М.П. Особенности использования современных теплоизоляционных материалов на полимерной основе // Энергобезопасность и энергосбережение. 2011. № 1. С. 24–27.
10. Трещалин М.Ю., Тюменев Ю.Я., Трещалина А.В., Пузанова Н.В. Проектирование нетканых материалов, снижающих техногенное воздействие на окружающую среду (на примере геотекстильных полотен). М.: ПАИМС, 2001. 132 с.
11. Тарасов В.А., Тимофеев М.П., Ермакова Ю.В., Боярская Р.В. Анализ свойств и особенностей функционирования высокопористых теплоизоляционных материалов на основе базальтового волокна // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2013. № 4. С. 129.
12. Горлов Ю.П. Технология теплоизоляционных материалов. М.: Стройиздат, 1980. 396 с.
13. Bolshakova N.V., Kostenok O.M. Thermal conductivity of basalt fiber materials // Refractories. 1995. Vol. 36. P. 331–332. DOI: 10.1007/BF02227481.
14. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
15. Тимрот Д.Л. Определение теплопроводности строительных и изоляционных материалов. М.: Энергоиздат, 1932. 120 с.
16. Кауфман Б.Н. Теплопроводность строительных материалов. М.: ГИЛСА, 1955. 82 с.
17. Чудновский А.Ф. Теплообмен в дисперсных средах. М.: ГИТСЛ, 1954. 444 с.
18. Zhang B.-M., Zhao S.-Y., He X.-D. Experimental and theoretical studies on high-temperature thermal properties of fibrous insulation // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2008. Vol. 109. P. 1309–1324.
19. Daryabeigi K. Heat Transfer in High-Temperature Fibrous Insulation // 8th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. St. Louis, 2002. DOI: 10.2514/6.2002-3332.
20. Wang M., Pan N. Predictions of effective physical properties of complex multiphase materials // Materials Science and Engineering. 2008. Vol. 63. P. 1–30.
21. Zhou H., Zhang S., Yang M. The effect of heat-transfer passages on the effective thermal conductivity of high filler loading composite materials // Composites Science and Technology. 2007. Vol. 67. P. 1035–1040. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.06.004.
22. МДС 41-7.2004. Методика оценки влияния влажности на эффективность теплоизоляции оборудования и трубопроводов / НИЦ АО «Теплопроект». М., 2004. URL: <http://base1.gostedu.ru/44/44607> (дата обращения: 17.04.2021).
23. Wang Q.L., He J.H., Li Z.B. Fractional Model for Heat Conduction in Polar Bear Hairs // Thermal Science. 2012. Vol. 16. Is. 2. P. 339–342.
24. He J.-H. A New Fractal Derivation // Thermal Science. 2011. Vol. 15. Is. suppl. 1. P. S145–S147. DOI: 10.2298/TSCII1S1145H.