
Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-127-137

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОХОЖДЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ФРОНТА ЧЕРЕЗ ОБРАЗЕЦ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

В.В. Бутаков¹, А.А. Шавнев¹, А.А. Луговой¹, Н.М. Варрик¹, В.Г. Бабашов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Проведены проверка принципиальной возможности количественной оценки коэффициента теплоотдачи материала при помощи стенда, а также подбор параметров эксперимента для повышения достоверности оценки коэффициента теплопроводности слоистого материала. Установлена возможность использовать в рамках одного испытания одну часть массива данных для оценки коэффициента теплоотдачи материала на его горячей стороне, а при обработке другой части экспериментальных данных использовать коэффициент теплоотдачи для оценки поглощаемой образцом теплоты. Предложенный метод оценки значительно проще по аппаратному обеспечению по сравнению с классическим калориметрическим методом.

Ключевые слова: теплозащитный материал, коэффициент теплопроводности, тепловой поток, высокопористый материал, математическая модель

Для цитирования: Бутаков В.В., Шавнев А.А., Луговой А.А., Варрик Н.М., Бабашов В.Г. Подход к построению математической модели прохождения теплового фронта через образец теплозащитного материала в условиях нестационарного теплового потока // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-127-137.

Scientific article

AN APPROACH TO THE CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE PASSAGE OF A HEAT FRONT THROUGH A SAMPLE OF A HEAT-SHIELDING MATERIAL UNDER CONDITIONS OF AN UNSTEADY HEAT FLOW

V.V. Butakov¹, A.A. Shavnev¹, A.A. Lugovoy¹, N.M. Varrik¹, V.G. Babashov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. In this work, the principal possibility of quantifying the heat transfer coefficient of the material using a stand was tested, as well as the selection of experimental parameters to increase the reliability of the assessment of the thermal conductivity coefficient of the layered material. It is possible to use one part of the data array within one test to estimate the heat transfer coefficient of the material on its hot side, and when processing another part of the experimental data, to use the heat transfer coefficient to estimate the heat absorbed by the sample. The proposed estimation method is much simpler in terms of hardware compared to the classical calorimetric method.

Keywords: heat-shielding material, thermal conductivity coefficient, heat flux, highly porous material, mathematical model

For citation: Butakov V.V., Shavnev A.A., Lugovoy A.A., Varrik N.M., Babashov V.G. An approach to the construction of a mathematical model of the passage of a heat front through a sample of a heat-shielding material under conditions of an unsteady heat flow. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-127-137.

Введение

Высокопористые огнеупорные материалы, работающие в широком диапазоне температур (от отрицательных до 1000 °С и более), в настоящее время являются основными компонентами теплозащитных систем современной техники [1–4]. В частности, волокнистые материалы на основе оксида кремния использовали в качестве основного компонента внешней тепловой защиты во всех летательных аппаратах Space Shuttle (материалы марок Li-900 и Li-2200) и «Буран» (материалы марок ТЗМК-10 и ТЗМК-25) [5, 6]. Основной эксплуатационной характеристикой теплоизоляционных материалов, в том числе и на основе волокон из оксидов кремния, алюминия, а также их комбинаций, является теплопроводность. Однако, поскольку теплозащитные системы состоят, помимо огнеупорных волокон, из различных компонентов, а именно – связующих, защитных покрытий, гидрофобизирующих агентов и, возможно, других добавок, то проблема моделирования теплопереноса в таких материалах – весьма сложная задача, решением которой занимались исследователи и разработчики материалов, что привело к развитию представлений об особенностях комбинированного теплопереноса в таких средах, теоретическому и экспериментальному изучению теплофизических и оптических свойств, определению влияния на них характеристик структуры композиционных материалов [7–11].

Результирующая теплопроводность волокнистого теплоизоляционного материала складывается из кондукционной составляющей теплопроводности воздуха в порах, а также кондукционной и радиационной составляющих теплопроводности минеральной матрицы. Ввиду частичной прозрачности волокон и высокой пористости материалов перенос теплоты происходит одновременно и взаимосвязано по нескольким механизмам: по твердому каркасу и газовой среде в порах, конвективным путем в объеме материала и за счет энергии излучения.

Учет всех механизмов в теоретическом виде представляет большую сложность. Практически во всех случаях процессы распространения теплоты (теплопроводность, конвекция, тепловое излучение) происходят совместно [12]. Теплоизоляционные материалы содержат компоненты, претерпевающие фазовые превращения или вступающие в химические реакции.

Стенд, описанный в работах [13, 14], позволяет осуществлять односторонний нагрев образцов и получать картину распространения теплового фронта по заранее определенным точкам образца. В статье [15] дан подробный анализ способа оценки эффективной теплопроводности отдельного слоя многослойного теплозащитного материала (ТЗМ) в условиях одностороннего нагрева.

Научный интерес представляет составление модели поведения многослойного образца ТЗМ при одностороннем нагреве, пригодной для автоматизации процесса оценки теплофизических свойств по распространению теплового фронта по слоям испытанного образца.

Формализованное представление о точках, температура которых важна для понимания процесса распространения теплового потока через образец, должно позволить оптимальным образом располагать термпары по толщине образца, а также будет способствовать повышению точности оценки теплофизических свойств образцов.

Цель данной работы – проверка принципиальной возможности количественной оценки коэффициента теплоотдачи материала при помощи стенда [14], а также подбор параметров эксперимента для повышения достоверности оценки коэффициента теплопроводности материала.

Материалы и методы

Теплофизическая задача

Рассмотрим модель прохождения теплового потока через однослойную плоскую стенку. Графическое представление такой модели представлено на рис. 1.

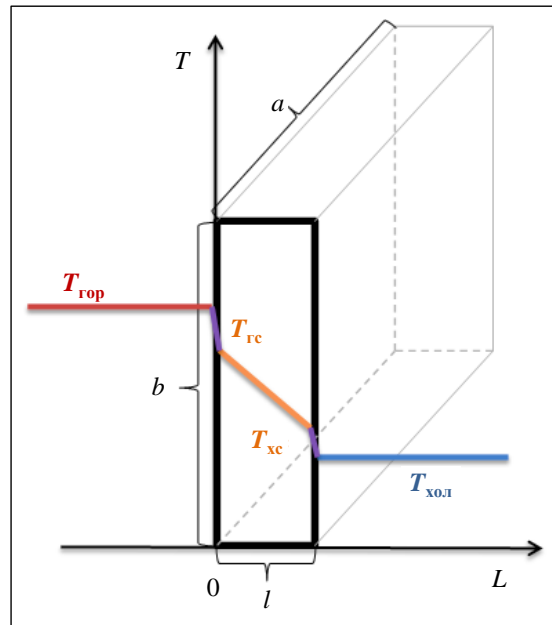


Рис. 1. Представление о распределении температуры по толщине плоской стенки при одностороннем нагреве

Закон теплопроводности Фурье в интегральной форме для плоской стенки может быть записан как

$$P = \lambda \frac{S(T_{\text{гс}} - T_{\text{хс}})}{l}, \quad (1)$$

где P – мощность потока; λ – эффективная теплопроводность материала; S – площадь сечения образца ($S = a \times b$); l – толщина образца; $(T_{\text{гс}} - T_{\text{хс}})$ – разность температур на горячей и холодной поверхности образца.

При этом тепловой поток через границу стенки (теплопередача) может быть записан следующим образом:

$$P = \alpha \cdot S(T_{\text{ср}} - T_{\text{ст}}), \quad (2)$$

где P – мощность потока; α – коэффициент теплоотдачи; S – площадь сечения образца ($S = a \times b$); $(T_{\text{ср}} - T_{\text{ст}})$ – разность температур среды и поверхности образца (в случае, показанном на рис. 1, это $(T_{\text{гор}} - T_{\text{гс}})$ для горячей стороны образца либо $(T_{\text{хс}} - T_{\text{хол}})$ для холодной стороны).

Коэффициент теплоотдачи α – это плотность теплового потока при перепаде температур на 1 К, который имеет размерность $[\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$. Если рассматривать тепловой поток как вектор, то он направлен перпендикулярно площадке поверхности, через которую протекает. Принципиально, что коэффициент теплоотдачи является эмпирическим

и может меняться (в случае теплопередачи на границе «поверхность–газ») в зависимости от параметров газа, картины обтекания поверхности, состояния и температуры поверхности.

В то же время в пределах однопериодных испытаний различных образцов при сходных температурах коэффициент теплоотдачи можно с высокой долей достоверности считать свойством материала, зависящим только от природы испытываемого образца и его температуры ($\alpha = f(T)$).

С учетом допущений, что площадь сечения образца постоянна, а тепловой поток неразрывен и однонаправлен, можно записать для стационарного теплового потока:

$$P = \alpha_{\text{гор}} \cdot S(T_{\text{гор}} - T_{\text{гс}}) = \lambda \frac{S(T_{\text{гс}} - T_{\text{хс}})}{l} = \alpha_{\text{хол}} \cdot S(T_{\text{хс}} - T_{\text{хол}}), \quad (3)$$

или

$$\alpha_{\text{гор}}(T_{\text{гор}} - T_{\text{гс}}) = \lambda \frac{S(T_{\text{гс}} - T_{\text{хс}})}{l} = \alpha_{\text{хол}}(T_{\text{хс}} - T_{\text{хол}}). \quad (4)$$

Рассмотрим с учетом выражения (4) реальное испытание однослойного тонкого образца на стенде одностороннего нагрева, описанном в патенте [14]. Схема стенда приведена на рис. 2.

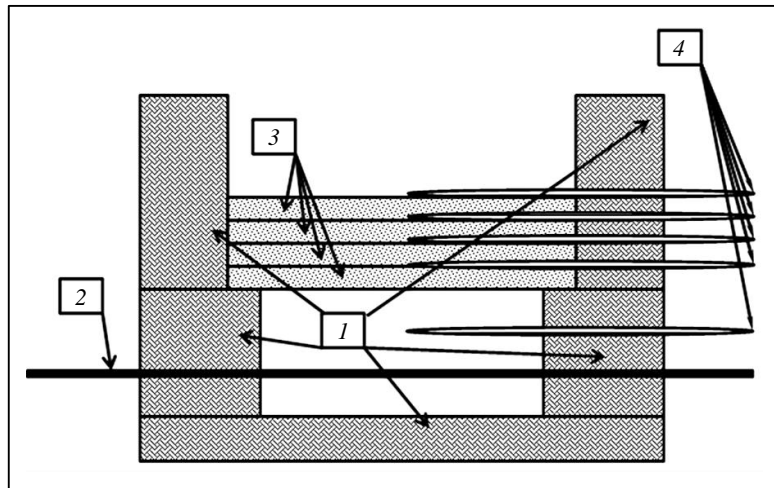


Рис. 2. Схема стенда одностороннего нагрева при испытании многослойного образца: 1 – корпус печи; 2 – нагреватели; 3 – слои образца; 4 – термопары

В начале испытания вся система имеет температуру окружающей среды ($T_{\text{хол}}$). Внутренний объем стенда начинает нагреваться. Его температуру обозначим как $T_{\text{гор}}$. Стенд позволяет в любой момент времени получить температуру нескольких точек по толщине образца или несколько точек графика функции $T(L)$ с рис. 1.

Тепловой поток через образец стационарным не является, так как происходит нагревание внутреннего объема стенда, тепловому фронту нужно время для прохождения через образец, меняется характер теплопередачи от внутреннего объема стенда к образцу. Для описания процесса обозначим временные интервалы между измерениями стенда τ . Примем также, что временной интервал между измерениями достаточно мал, чтобы изменение температуры во времени в каждой точке можно было считать линейным. Под температурами точек в момент времени с номером n примем усреднения вида $T^n = \frac{T^n + T^{n-1}}{2}$. С учетом указанных приближений можно описать состояние образца выражением

$$\alpha_{\text{гор}}(T_{\text{гор}} - T_{\text{гс}})\tau = \lambda \frac{(T_{\text{гс}} - T_{\text{хс}})}{l} \tau + \sigma U = \alpha_{\text{хол}}(T_{\text{хс}} - T_{\text{хол}})\tau, \quad (5)$$

где σU – изменение внутренней энергии образца за время τ .

При известной теплоемкости материала (c) изменение внутренней энергии можно определить как

$$\sigma U = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T}{s} = c \cdot l \cdot \rho \cdot \Delta T, \quad (6)$$

где ΔT – изменение средней температуры образца; ρ – плотность материала.

В принятых ранее обозначениях для рис. 1 можно записать:

$$\Delta T^n = \left(\frac{T_{\text{хс}}^n + T_{\text{гс}}^n}{2} \right) - \left(\frac{T_{\text{хс}}^{n-1} + T_{\text{гс}}^{n-1}}{2} \right). \quad (7)$$

При увеличении количества слоев испытываемого образца и расположении термопар между образцами можно получить картину распространения теплового фронта через образец во времени.

Выражение (5) позволяет провести машинную обработку полученного массива данных и, рассматривая обособленно срединные слои образца во время прохождения через них теплового фронта, вычислить коэффициент эффективной теплопроводности для материала образца в форме $\lambda = f(T)$.

Принимая слои образца одинаковыми, можно также провести обработку полученного со стенда одностороннего нагрева массива данных для определения коэффициента теплоотдачи на лицевых сторонах образца.

Задача исследования

Экспериментальная задача исследования состоит:

- в подборе таких временных интервалов и скорости нагрева стенда, чтобы, с одной стороны, обеспечить значительное изменение температуры в течение временного интервала по сравнению с «шумом», а с другой – оставить временной интервал достаточно малым, чтобы тепловой поток через образец в пределах временного интервала можно было считать стационарным;
- в проверке принципиальной возможности оценки коэффициента теплоотдачи материала на горячей стороне в условиях одностороннего нагрева.

Описание образцов и условий испытания

В данной статье рассматриваются четырехслойные образцы волокнистого теплозащитного материала. Слои имеют одинаковую плотность и толщину. Термопары (спаи термопар) расположены между слоями по центру образца. Дополнительные термопары помещены в объем печи и на внешнюю (холодную) лицевую сторону образца. Регистрируются также показания управляющей термопары стенда и температура помещения вблизи стенда.

Испытания проводили при скорости нагрева 40 °С/мин, показания термопар регистрировали с частотой 1 раз в секунду.

Результаты и обсуждение

В результате испытания получена картина распределения температур по толщине образца во времени. Результирующий график с исходными данными приведен на рис. 3.

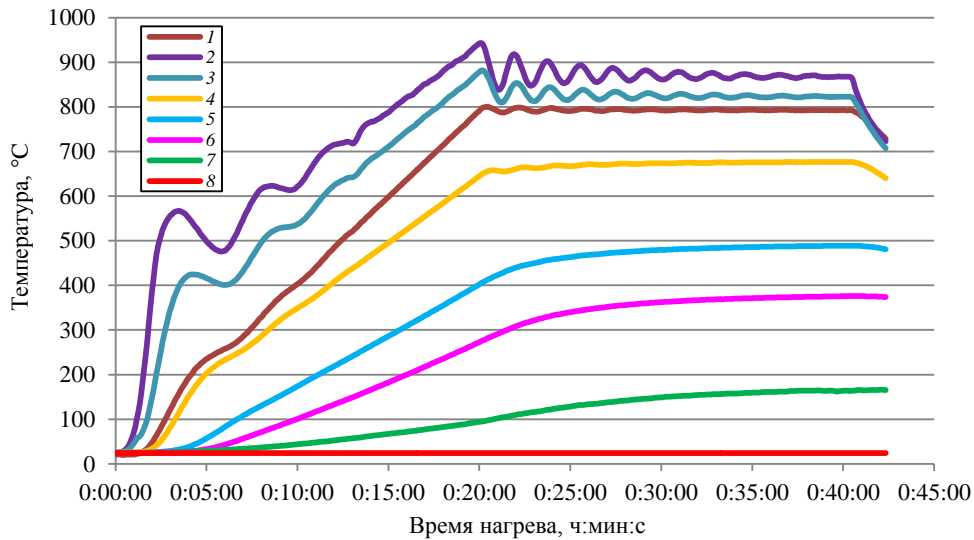


Рис. 3. Исходные данные (1 – показания управляющей термопары) для определения теплофизических свойств образца при температуре: 2 – в печи; 3 – на горячей стороне образца; 4 – между слоями 1 и 2; 5 – между 2 и 3 слоем; 6 – между 3 и 4 слоем; 7 – на холодной стороне образца; 8 – окружающей среды

Участок испытания с времени 0:01:30 (1 мин 30 с) до времени 0:03:45 (3 мин 45 с) используется для определения коэффициента эффективной теплопроводности материала; участок испытания с времени 0:01:30 (1 мин 30 с) до времени 0:20:19 (20 мин 19 с) – для определения коэффициента теплоотдачи.

В электронных таблицах Excel исходные данные отбирали для вычисления соответствующих коэффициентов и автоматизированной оценки погрешности определения. При отборе данных из выбранных массивов регулировали временные интервалы (длительность шага) в пределах от 1 до 30 с.

На рис. 4 представлены результаты вычисления коэффициента теплоотдачи образца, определенные при интервале измерений от 5 до 30 с.

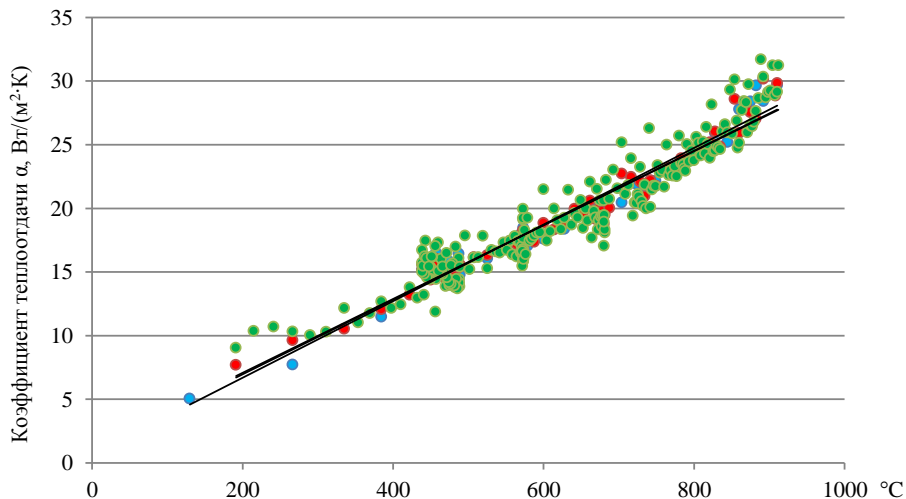


Рис. 4. Коэффициент теплоотдачи на горячей стороне образца, вычисляемый при длительности интервала единичного измерения 30 (●), 15 (●) и 5 с (●)

На рис. 4 приведены линейные приближения для каждого из вариантов вычисления и разброс значений. Хорошо видно, что значение коэффициента теплоотдачи

практически не зависит от длины шага в исследованных пределах. При уменьшении времени шага до 5 с соотношение шум/сигнал повышается, что сказывается на увеличении разброса. В то же время увеличение длительности шага вычислений не влияет на абсолютное значение вычисленного коэффициента. Таким образом, коэффициент теплоотдачи на горячей стороне образца может быть определен с точностью до 10 %.

На рис. 5 представлены результаты вычисления коэффициента эффективной теплопроводности при длине шага от 5 до 30 с.

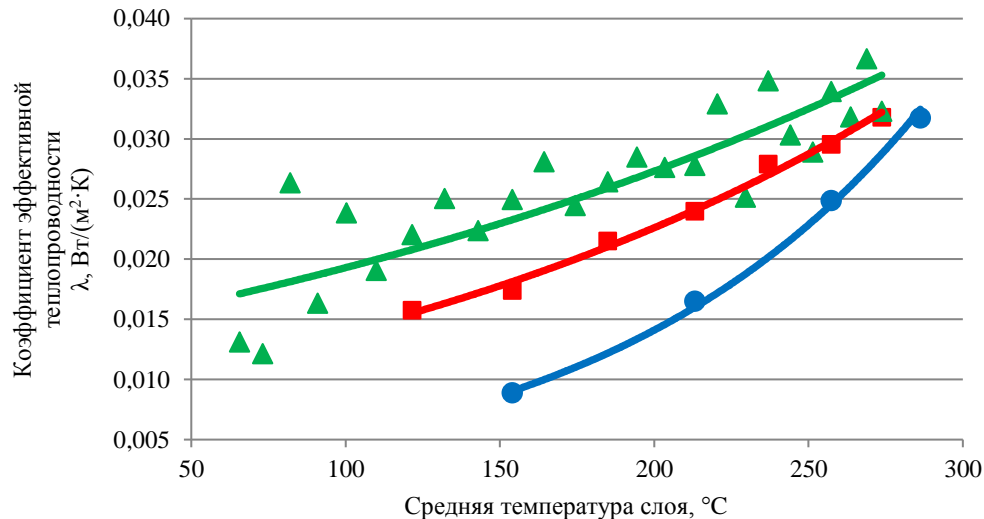


Рис. 5. Коэффициент эффективной теплопроводности, вычисляемый по экспоненциальному закону при длительности интервала единичного измерения 30 (—), 15 (—) и 5 с (—)

Вычисляли коэффициент теплопроводности первого (самого горячего) слоя. При этом в качестве калориметрического тела для определения теплопроводности первого слоя принимали три последующих.

На рис. 5 приведены экспоненциальные обобщения для каждого из вариантов вычисления и разброс значений. Следует отметить, что при уменьшении длительности шага измерений погрешность растет, однако при этом меняется и абсолютное значение вычисляемого коэффициента. Это связано с тем, что определение коэффициента эффективной теплопроводности основывается на допущении о линейности градиента температур по толщине рассматриваемого (первого) слоя и его постоянстве. Уменьшение длительности шага способствует увеличению достоверности этого допущения. Однако при дальнейшем уменьшении длительности шага уровень полезного сигнала термомпары (приращение температуры) становится сопоставим с шумом термомпары, и разброс значений вокруг экспоненциального приближения увеличивается до 30 %.

Вычисленные значения коэффициента теплопроводности с точностью до 30–50 % совпадают со значениями коэффициента эффективной теплопроводности, определенного классическим калориметрическим способом. Таким образом, вычисление коэффициента эффективной теплопроводности требует проведения испытаний с длительностью шага измерений не более 5 с. Увеличение длительности шага влияет на значение вычисляемой величины. Коэффициент теплопроводности может быть вычислен с погрешностью ~30 %.

На рис. 6 приведены для сравнения результаты вычислений коэффициента теплоотдачи при длительности шага в 1 с.

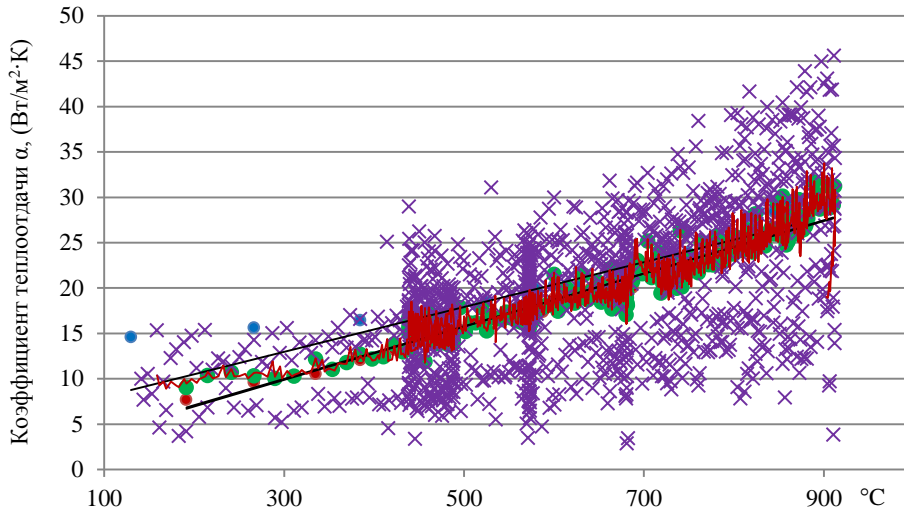


Рис. 6. Коэффициент теплоотдачи на горячей стороне образца, вычисляемый при длительности интервала единичного измерения 30 (●), 15 (●), 5 (●) и 1 с (×); — линейный фильтр ряда по 5 точкам

Видно, что соотношение сигнал/шум значительно увеличивается, однако линейная фильтрация точек позволяет получить ту же зависимость, что и при большей длительности шага.

На рис. 7 приведены результаты вычислений коэффициента эффективной теплопроводности при длительности шага в 1 с.

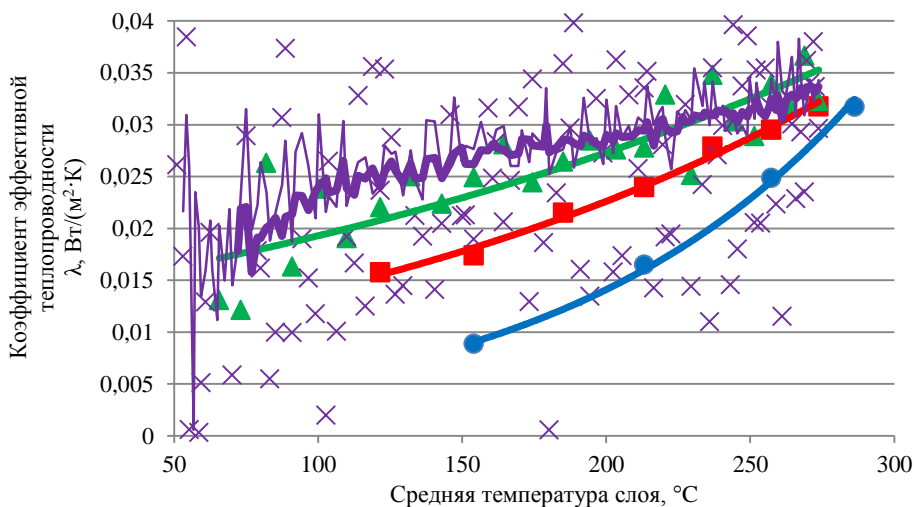


Рис. 7. Коэффициент эффективной теплопроводности, вычисляемый по экспоненциальному закону при длительности интервала единичного измерения 30 (—), 15 (—) и 5 с (—); —, — линейный фильтр ряда (×) (1 с) соответственно по 5 и 20 точкам

Соотношение шум/сигнал в таком случае становится настолько большим, что погрешность единичного измерения превышает 90 %, а результат вычисления может смещаться в диапазоны значений, не имеющих физического смысла (например, коэффициент эффективной теплопроводности не может быть отрицательным). При этом линейная фильтрация значений позволяет получить в интервале температур зависимость $\lambda = f(T)$, совпадающую с точностью 25–40 % с зависимостью, полученной calorimetricким методом.

Таким образом, уменьшение длительности шага до 1 с при оценке коэффициента эффективной теплопроводности целесообразно потому, что позволяет получить зависимость коэффициента эффективной теплопроводности от температуры материала с большей достоверностью. В то же время уменьшение длительности шага требует большего внимания при обработке результатов измерений.

Заключения

Проведенная работа подтвердила принципиальную возможность оценки коэффициента теплоотдачи материала на его горячей стороне при помощи стенда одностороннего нагрева. Эмпирический коэффициент теплоотдачи материала может использоваться при теоретическом моделировании процессов теплопередачи в материале в составе теплозащитных конструкций. Важной особенностью примененного метода оценки коэффициента теплоотдачи является то, что оценка проводится в условиях нестационарного теплового потока.

Принципиальным результатом исследования является возможность использовать в рамках одного испытания одну часть массива данных (начальный этап испытания, разогрев стенда) для оценки коэффициента теплоотдачи материала на его горячей стороне, а при обработке другой части экспериментальных данных (выдержка) использовать коэффициент теплоотдачи для оценки поглощаемой образцом теплоты.

Коэффициент теплоотдачи – и, как следствие, теплопоглощение материала при конкретном испытании – может быть оценен с погрешностью, не превышающей 10 %, что позволяет уверенно использовать получаемые результаты при дальнейшей обработке результатов измерений.

Результатом работы также стал подбор длительности шага эксперимента, позволяющий повысить точность оценки коэффициента эффективной теплопроводности материала в условиях нестационарного теплового потока. Снижение длительности шага измерений до 1–5 с позволяет оценивать коэффициент эффективной теплопроводности испытываемого материала с достоверностью 40 %. Метод оценки по-прежнему уступает в точности классическому калориметрическому методу определения коэффициента теплопроводности, но значительно проще по аппаратному обеспечению.

Для дальнейшего развития работы целесообразно провести эксперименты по влиянию дискретизации измерения температуры по координате на точность оценки коэффициента эффективной теплопроводности, а также дать оценку коэффициента теплоотдачи материала на его холодной стороне.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
2. Soboyejo W.O., Obayemi J.D., Annan E. et al. Review of High Temperature Ceramics for Aerospace Applications // Advanced Materials Research. 2016. Vol. 1132. P. 385–407.
3. Каблов Е.Н., Жестков Б.Е., Гращенков Д.В., Сорокин О.Ю., Лебедева Ю.Е., Ваганова М.Л. Исследование окислительной стойкости высокотемпературного покрытия на SiC-материале под воздействием высокоэнтальпийного потока // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 6. С. 704–711.
4. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
5. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука и жизнь, 2013. 128 с.

6. Glass D.E. Thermal Protection Systems and Hot Structures for Hypersonic Vehicles // *Aerospace Materials and Applications* / ed. B.N. Bhat. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2018. P. 531–578. DOI: 10.2514/5.9781624104893.0531.0578.
7. Замула Г.Н., Иванов С.Н. Определение эффективной теплопроводности и излучательной способности многослойных и подкрепленных конструкций // *Ученые записки ЦАГИ*. 1970. Т. 1. № 1. С. 116–123.
8. Зуев А.В., Заричняк Ю.П., Баринов Д.Я. Определение теплопроводности теплозащитного материала на основе волокон оксида кремния // *Труды ВИАМ*. 2021. № 2 (96). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.03.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-88-98.
9. Зуев А.В., Заричняк Ю.П., Баринов Д.Я., Краснов Л.Л. Исследование теплофизических свойств гибкого теплоизоляционного материала // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.03.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.
10. Просунцов П.В., Майорова И.А., Зуев А.В. Использование моделей комбинированного теплопереноса для анализа температурного состояния элементов тепловой защиты многоразовых космических аппаратов // *Тепловые процессы в технике*. 2014. Т. 6. № 7. С. 317–323.
11. Wang X., Tang Y. The Heat Transfer Model and Performance Analyses of Fibre-Enhanced Phase Change Material // *Conference: Digital Manufacturing and Automation (ICDMA) International Conference*. China, 2010. DOI: 10.1109/ICDMA.2010.419.
12. Зарубин В.С., Зарубин С.В., Кувыркин Г.Н. Математическое моделирование теплопереноса в однонаправленном волокнистом композите // *Наука и образование*. 2014. № 1. С. 270–281. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/657262.html> (дата обращения: 02.03.2022). DOI: 10.7463/0114.0657262.
13. Луговой А.А., Бабашов В.Г., Карпов Ю.В. Температуропроводность градиентного теплоизоляционного материала // *Труды ВИАМ*. 2014. № 2. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.03.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-2-2-2.
14. Стенд для качественной оценки теплоизоляционных материалов: пат. 156904 Рос. Федерация. № 2014138916; заявл. 25.09.14; опубл. 20.11.15.
15. Бутаков В.В., Луговой А.А., Варрик Н.М., Бабашов В.Г. Оценка теплопроводности слоистого высокопористого теплоизоляционного материала // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. В печати.

References

1. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFFI*, 2017, no. 3, pp. 97–105.
2. Soboyejo W.O., Obayemi J.D., Annan E. et al. Review of High Temperature Ceramics for Aerospace Applications. *Advanced Materials Research*, 2016, vol. 1132, pp. 385–407.
3. Kablov E.N., Zhestkov B.E., Grashchenkov D.V., Sorokin O.Yu., Lebedeva Yu.E., Vaganova M.L. Investigation of the oxidation resistance of a high-temperature coating on SiC-material under the influence of a high-enthalpy flow. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2017, vol. 55, no. 6, pp. 704–711.
4. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
5. *Armor for "Buran". Materials and technologies of VIAM for the ISS "Energiya–Buran"*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: Nauka i zhizn, 2013, 128 p.
6. Glass D.E. Thermal Protection Systems and Hot Structures for Hypersonic Vehicles. *Aerospace Materials and Applications*. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2018, pp. 531–578. DOI: 10.2514/5.9781624104893.0531.0578.
7. Zamula G.N., Ivanov S.N. Determination of the effective thermal conductivity and emissivity of multilayer and reinforced structures. *Uchenye zapiski TsAGI*, 1970, vol. 1, no. 1, pp. 116–123.

8. Zuev A.V., Zarichnyak Yu.P., Barinov D.Ya. Measurement of thermophysical properties rigid fiber insulation. *Trudy VIAM*, 2021, no. 2 (96), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 02, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-88-98.
9. Zuev A.V., Zarichnyak Yu.P., Barinov D.Ya., Krasnov L.L. Measurement of thermophysical properties of flexible thermal insulation. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 02, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.
10. Prosuntsov P.V., Mayorova I.A., Zuev A.V. Using combined heat transfer models to analyze the temperature state of thermal protection elements of reusable spacecraft. *Teplovye protsessy v tehniki*, 2014, vol. 6, no. 7, pp. 317–323.
11. Wang X., Tang Y. The Heat Transfer Model and Performance Analyses of Fibre-Enhanced Phase Change Material. *Conference: Digital Manufacturing and Automation (ICDMA) International Conference*. Changoha, 2010. DOI: 10.1109/ICDMA.2010.419.
12. Zarubin V.S., Zarubin S.V., Kuvyrkin G.N. Mathematical modeling of heat transfer in a unidirectional fibrous composite. *Nauka i obrazovanie*, 2014, no. 1, pp. 270–281. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/657262.html> (accessed: March 02, 2022). DOI: 10.7463/0114.0657262.
13. Lugovoy A.A., Babashov V.G., Karpov Yu.V. The thermal diffusivity of the gradientthermal insulation material. *Trudy VIAM*, 2014, no. 2, paper no. 02. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: March 02, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-2-2-2.
14. *Stand for the qualitative assessment of heat-insulating materials*: pat. 156904 Rus. Federation. No. 2014138916; filed 25.09.14; publ. 20.11.15.
15. Butakov V.V., Lugovoy A.A., Varrik N.M., Babashov V.G. Assessment of thermal conductivity of a layered highly porous thermal insulation material. *Aviation materials and technology*, 2022. Accepted to publication.

Информация об авторах

Бутаков Вячеслав Владимирович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Шавнев Андрей Александрович, заместитель начальника НИО, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Луговой Алексей Алексеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Варрик Наталья Мироновна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бабашов Владимир Георгиевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vyacheslav V. Butakov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey A. Shavnev, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksey A. Lugovoy, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalia M. Varrik, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vladimir G. Babashov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 31.03.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 05.04.2022.

The article was submitted 31.03.2022; approved and accepted for publication after reviewing 05.04.2022.