

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**В.И. Томак**

**А.С. Бурков**

**А.М. Рыцарев**

**В.А. Товстоног**

mgtu-e14@mail.ru

tovstonog@bmstu.ru

**МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**

---

### **Аннотация**

Создание высокотемпературных конструкционных, теплозащитных и теплоизоляционных материалов с предельно высокими рабочими температурами 2000...2500 °С — одна из важнейших проблем развития перспективных образцов аэрокосмической техники и высокоэффективных энергетических установок. Для создания даже опытных образцов необходим качественный скачок в области материаловедения и производства новых высокотемпературных композиционных и теплоизоляционных материалов, обеспечивающих теплозащиту и допустимый температурный режим элементов конструкции при высоких значениях температуры. Практическое применение разрабатываемых материалов требует оценки всего комплекса их физико-механических, оптических и теплофизических характеристик, что может быть выполнено только при проведении экспериментальных исследований. Разработана конструкция экспериментальной установки и методика приближенной оценки теплофизических характеристик высокопористых теплоизоляционных материалов при температуре до 2000 °С. Источником нагрева образцов с характерным размером до 50 × 50 мм служит много-сопловая горелка на топливных компонентах пропан/кислород или ацетилен/кислород. Приведено обоснование методики обработки результатов измерений в целях определения теплофизических характеристик, а также результаты исследования теплопроводности высокопористого материала на основе оксида циркония

### **Ключевые слова**

*Теплопроводность, температуропроводность, температура, теплоизоляционные материалы, экспериментальные методы, много-сопловая горелка*

Поступила 13.11.2019

Принята 25.12.2019

© Автор(ы), 2020

**Введение.** В странах с развитой аэрокосмической промышленностью ведутся интенсивные работы по созданию опытных образцов высокоскоростных атмосферных летательных аппаратов и двигательных установок [1–4]. Однако для их серийного производства необходим качественный скачок в области материаловедения с разработкой и внедрением в производство новых высокотемпературных композиционных материалов, обеспечивающих теплозащиту элементов конструкции при высоких значениях температуры [5–7], в том числе высокотемпературных конструкционных и теплоизоляционных материалов [8–14]. Применение таких материалов требует всесторонней оценки комплекса их физико-механических, оптических и теплофизических характеристик, что может быть выполнено только при проведении экспериментальных исследований.

Наиболее существенные различия между высокотемпературными конструкционными и теплоизоляционными материалами связаны с их назначением, что в тепловом отношении в первую очередь может характеризоваться теплопроводностью; для теплоизоляционных материалов это один из основных показателей тепловой эффективности. Этот параметр в некоторых случаях может быть решающим, но не единственным, и на практике обычно к материалу предъявляется комплекс требований в зависимости от условий работы и специфики объекта. Теплопроводность, являющаяся физической характеристикой материала, как правило, зависит от структурных характеристик — морфологии основы и кажущейся плотности, определяемой пористостью. Таким образом, создание высокотемпературных эффективных теплоизоляционных материалов связано с выбором соединений, работоспособных в предполагаемых условиях эксплуатации, и получением на их основе высокопористых структур, обеспечивающих требуемый комплекс физико-механических свойств.

Такое понятие, как «теплопроводность материала», строго справедливо для сплошной среды. Теплоизоляционные материалы обычно представляют собой структурно сложные многофазные системы (простейшей может полагаться пористая среда, где одна из фаз — каркас структурно и химически однородного материала, а другая — заполняющая поры среда). Теплопередача в таких материалах осуществляется не только теплопроводностью, но и одновременно протекающими процессами конвекции и массопереноса в порах и тепловым излучением [8, 15]. Для такой среды в технических расчетах теплопереноса обычно используется величина «эффективная теплопроводность», которая, по сути, является функционалом температурного состояния тела и в обобщенном виде

учитывает все протекающие процессы без их детализации. Поэтому в технических приложениях необходимо давать оценку условий получения используемых данных о теплопроводности и допустимой области их применения.

Разработка методов экспериментального определения или теоретической оценки (моделирования) коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов обычно основана на некоторой системе классификации. Наиболее распространенной является классификация на монолитные, несвязанные, волокнистые и комбинированные материалы, а к определяющим признакам относятся характер структуры, число компонентов и их агрегатное состояние [16, 17].

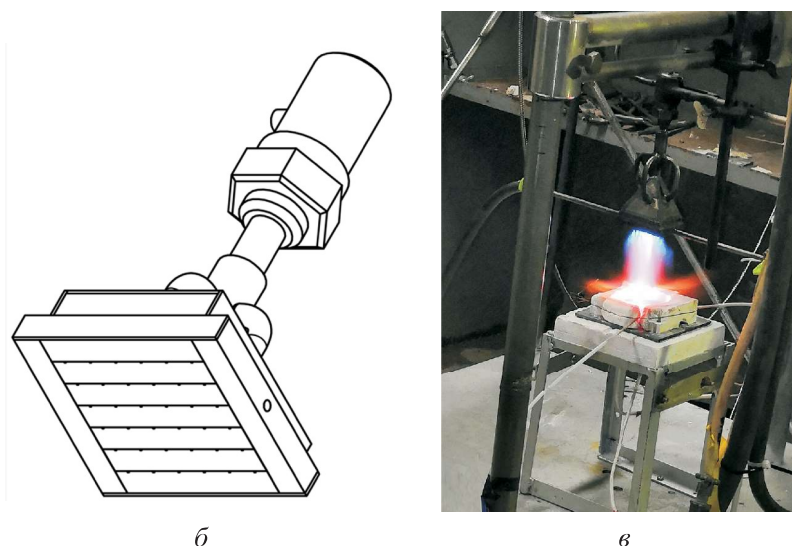
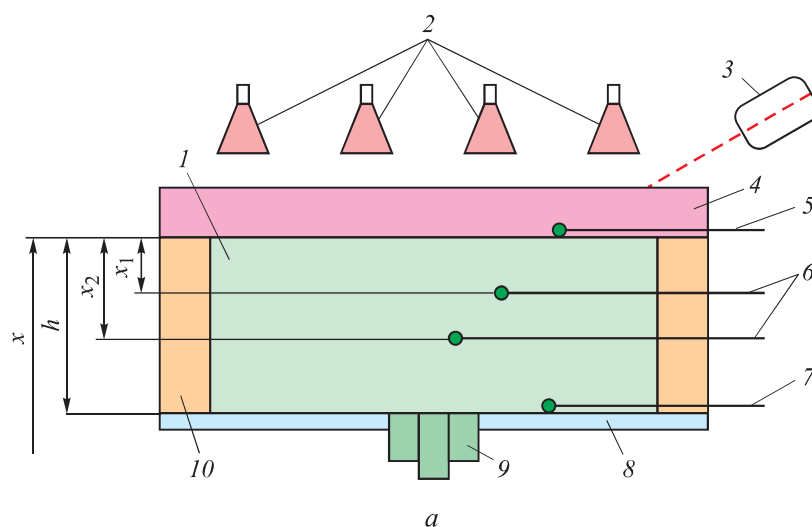
Теплоперенос в теплоизолирующем материале сложного структурного строения происходит как за счет теплопроводности по элементам среды, так и процессов молекулярного, конвективного и радиационного переноса энергии между элементами, а также физико-химических превращений и гетерогенных химических реакций между компонентами материала, и является сложной функцией состояния (функционалом) среды. В технических расчетах процессов теплопереноса и сложного теплообмена обычно используют приближение сплошной среды, тепловой поток выражают на основании закона Фурье в дифференциальной форме  $q = -\lambda_{ef} \text{grad } T$ . При этом эффективный коэффициент теплопроводности  $-\lambda_{ef}$  сложным образом связан со свойствами элементов среды и ее состоянием. В порядке приближения этот коэффициент может быть представлен аддитивной суммой составляющих теплопроводности, учитывающих совокупность процессов переноса в структурно-неоднородной среде:  $\lambda_{ef} = \lambda_s + \lambda_m + \lambda_c + \lambda_r + \lambda_f$ , где  $\lambda_s$ ,  $\lambda_m$ ,  $\lambda_c$ ,  $\lambda_r$ ,  $\lambda_f$  — составляющие теплопроводности за счет кондуктивной теплопередачи по каркасу, молекулярного теплопереноса, конвективного теплопереноса, радиационного теплопереноса и физико-химических превращений. Ввиду сложности детального описания процессов теплопереноса в средах сложного структурного строения для оценок того или иного процесса обычно используют приближенные полуэмпирические модели, чаще всего позволяющие лишь качественно отразить влияние того или иного процесса теплопереноса. В связи с этим важное значение имеют экспериментальные методы определения теплопроводности материалов.

Существует достаточно большое число методов экспериментального определения теплопроводности [18–20]. Однако многие из них имеют ограниченную область применения или требуют решения сложных во-

просов технической реализации, что особенно показательно для высокотемпературных теплофизических исследований материалов сложного структурного строения — композиционных материалов разных типов, широко используемых в высокотемпературных аэрокосмических, энергетических и технологических конструкциях. Так, одна из наиболее совершенных теплофизических установок *LFA 427* фирмы *NETZSCH-Gerätebau GmbH*, в основу работы которой положен импульсный метод измерения теплофизических свойств Паркера [22–23], позволяет измерять теплопроводность и теплоемкость до температуры 2800 °С. При этом характерный размер образцов составляет около 10 мм, что требует тщательного анализа влияния граничных условий на результаты измерений. Кроме того, при проведении измерений требуется большое время выхода на стационарный режим нагрева, что аналогично измерениям на стабилизированных при определенной температуре образцах. Это исключает возможность учета кинетических процессов теплопереноса, сопутствующих высокоинтенсивному нестационарному нагреву материала, обычно имеющему место при полете высокоскоростных летательных аппаратов. В связи с этим практический интерес представляют методы определения теплофизических свойств в условиях нагрева, близких к натурным как по части тепловых нагрузок (высокоскоростной нагрев до уровня стационарных температур), так и условий применения. К ним можно отнести односторонний нагрев образца с размерами, позволяющими, во-первых, учесть структуру материала, а во-вторых, минимизировать неопределенности, связанные с граничными условиями (теплооттоком) на боковых поверхностях, что в наибольшей степени выполнимо для образцов с характерными поперечными размерами  $L \times L$ , превышающими толщину  $h$  образца. Таким требованиям удовлетворяют не прямые методы оценки теплофизических характеристик по результатам стендовых тепловых испытаний, нашедшие широкое применение при высокотемпературных исследованиях [24–27]. Такой подход основан на формулировке математической модели процесса теплопереноса, отражающей основные свойства исследуемого объекта при реально реализуемых условиях внешнего теплового воздействия, и учитывающей возможности аппаратурной регистрации параметров эксперимента. В этом случае практическая значимость оценок искомых параметров может быть получена при максимальной степени близости условий теплофизического эксперимента условиям натурального нагрева конструкции, содержащей элементы из исследуемого материала.

*Цель работы* — апробация методики оценки теплофизических характеристик высокотемпературных теплоизоляционных материалов при температуре до 2000...2500 °С.

**Методика эксперимента.** Нагрев образца 1 (рис. 1) с поперечными габаритными размерами 50 × 50 мм и толщиной  $h$  осуществляется тепловым потоком продуктов сгорания ацетилено-кислородной или пропано-кислородной смеси от многофакельной горелки 2 [28] через пластину термостойкого материала 4, непосредственно контактирующую с образ-



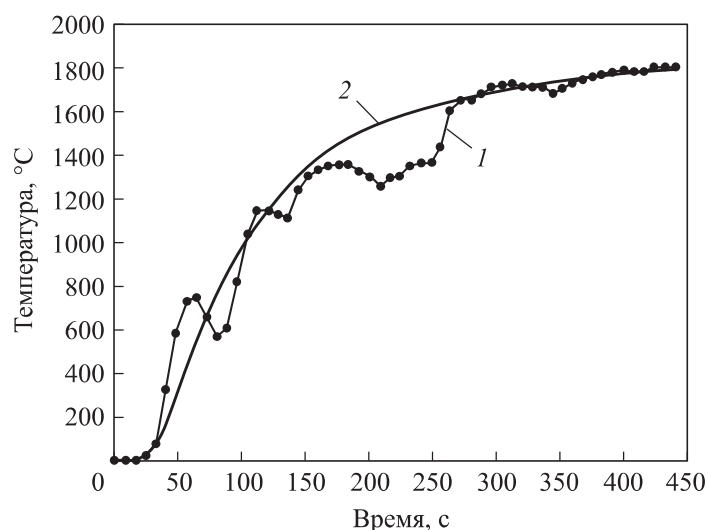
**Рис. 1.** Схема эксперимента для оценки теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов (а), общий вид многосопловой горелки (б) и экспериментальной установки (в)

цом (в экспериментах использованы пластины из углерод-углеродного материала и корунда). Тыльная поверхность образца через тонкую теплопроводную опорную пластину 8 контактирует с теплоизолирующей пластиной или находится в условиях естественного теплообмена с внешней средой. Боковые поверхности образца испытываемого материала теплоизолированы за счет его установки в охранном блоке 10. Таким образом, приведенная схема обеспечивает условия теплопередачи, близкие к одномерному процессу.

Температура нагреваемой поверхности контактной пластины определяется регистрирующим пирометром спектрального отношения 3, а ее тыльной поверхности — вольфрам-рениевыми термопарами 5, расположенными в плоскости контакта с образцом. Температура тыльной поверхности образца измеряется хромель-алюмелевыми термопарами 7, приваренными к опорной пластине, а тепловой поток, проходящий через образец, — дифференциальным датчиком теплового потока 9. Температура во внутренней области образца измеряется термопарами 6, вводимыми через боковые отверстия на заданных расстояниях  $x_i$  от нагреваемой поверхности. Регистрация температуры и теплового потока выполняется на ПЭВМ в нестационарном режиме нагрева с частотой 1 Гц. В силу того, что испытываемые образцы теплоизоляционных материалов имеют высокую пористость, следует отметить наличие плохо поддающихся численной оценке контактных термических сопротивлений между элементами нагревательно-измерительного блока.

**Основные расчетные соотношения и результаты.** При реализованных условиях эксперимента тепловое состояние образца существенно нестационарное и формируется при переменных и плохо обусловленных параметрах внешнего теплового воздействия. В первую очередь это связано с неплотностью контакта спая термопар с материалом. В связи с этим может быть дана лишь приближенная оценка теплофизических характеристик теплоизоляционного материала при принятых допущениях, таких как отсутствие тепловых потерь с боковых поверхностей, выполнение условия большой термической толщины слоя на временном интервале измерений и независимость теплофизических характеристик от температуры.

Экспериментальные данные термопарных измерений температуры на стыке контактной пластины и высокопористого образца из волокон оксида циркония плотностью  $\rho = 627 \text{ кг/м}^3$  (плотность монолитного материала  $\rho_0 \approx 6000 \text{ кг/м}^3$ , т. е. пористость образца  $\Pi \approx 90 \%$ ) приведены на рис. 2. Неплотности механического и теплового контакта нагреваемой



**Рис. 2.** Экспериментальная (1) и аппроксимирующая (2) зависимости температуры поверхности от времени нагрева

поверхности образца и термопар, используемых для регистрации температуры поверхности, приводят к следующему: экспериментальная временная зависимость, описывающая динамику нагрева поверхности  $T_w(t)$ , имеет не детерминированный, а стохастический характер, и для описания процесса нагрева следует использовать сглаживание экспериментальных данных функцией, отражающей особенности процесса нагрева и непротиворечащей физическому смыслу. В рассматриваемом случае эта функция должна учитывать затяжной характер роста температуры в начальные моменты времени, иметь верхнюю асимптоту, соответствующую стационарному режиму нагрева, и перегиб в области перехода от начального существенно нестационарного к замедляющемуся с течением времени режиму нагрева. В качестве такой функции выбрана четырехпараметрическая функция

$$T_w(t) = \sum_i a_i \left[ \text{th}(b_i t^{c_i}) \right]^{d_i},$$

где  $a_i, b_i, c_i, d_i$  — параметры, находимые из условия минимизации невязки

$$\omega = \sum_j \left[ T_{wj}^{\text{э}} - T_w(t_j) \right]^2, \quad 0 < t_j < t_{\Sigma},$$

на реализованном интервале времени нагрева  $0 < t < t_{\Sigma}$ . Здесь  $T_{wj}^{\text{э}}$ ,  $T_w(t_j)$  — экспериментальные значения температуры в точках регистрации  $t_j$  и соответствующие им аналитические значения. Для одного из экспериментов

такая сглаживающая кривая (см. рис. 2) построена по результатам измерений температуры двумя термомпарами на стыке контактной пластины и образца.

С учетом принятых допущений при заданной временной зависимости температуры поверхности  $T_w(t)$  пространственно-временное поле температуры нагреваемого образца описывается зависимостью [29]

$$T(x, t) = \frac{x}{2\sqrt{a\pi}} \int_0^t \frac{T_w(t-\eta)}{\eta^{3/2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\eta}\right) d\eta. \quad (1)$$

Формула (1) может быть положена в основу определения температуропроводности  $a$ . Так, если известна экспериментальная зависимость температуры нагреваемой поверхности от времени  $T_w(x=0, t)$  и подобная зависимость имеет место в некоторой точке на глубине  $x_1$  от нагреваемой поверхности  $T(x=x_1, t)$ , то температуропроводность  $a$  может быть определена из решения нелинейного уравнения

$$\omega(a_j) = \left[ T_w(x=0, t_j) - \frac{x_1}{2\sqrt{a_j\pi}} \int_0^{t_j} \frac{T_w(t_j-\eta)}{\eta^{3/2}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a_j\eta}\right) d\eta \right] = 0.$$

Здесь  $t_j$  — некоторый момент времени на интервале измерений (нагрева). При некоторой совокупности  $t_j$  может быть дана оценка температуропроводности

$$a = \frac{1}{N} \sum_j^N a_j \quad (2)$$

с дисперсией

$$s_a = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (a - a_j)^2}, \quad (3)$$

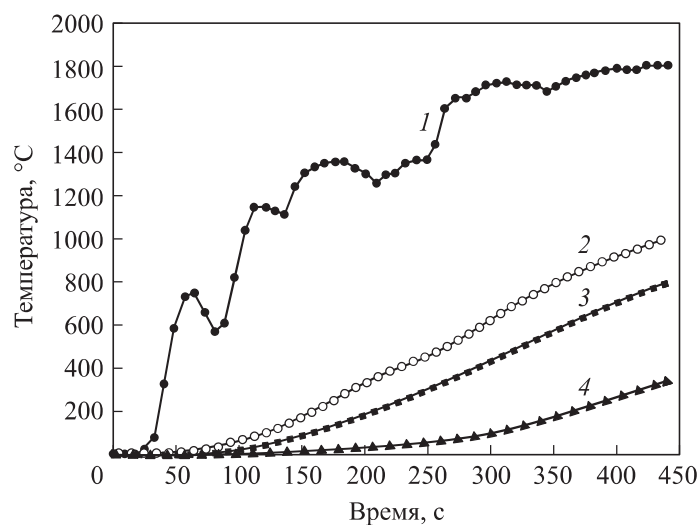
где  $N$  — совокупность точек  $t_j$ .

Экспериментальные зависимости температуры нагреваемой поверхности от времени в точках на расстоянии  $x_1 = 4,5$  и  $x_2 = 9$  мм от нагреваемой поверхности и на тыльной поверхности образца теплоизоляционного материала толщиной  $h = 18$  мм приведены на рис. 3.

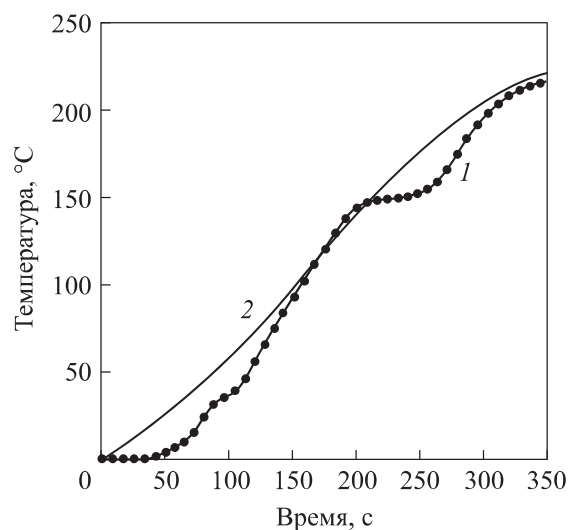
По приведенным экспериментальным данным полученная оценка температуропроводности составляет  $a = (0,0716 \pm 0,011) \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

В порядке модификации этого метода рассмотрим случай, когда исходной информацией является временная зависимость температуры в точке, ближайшей к нагреваемой поверхности ( $T(x_1, t)$ , см. рис. 3,





**Рис. 3.** Экспериментальные зависимости температуры нагреваемой поверхности (1) от времени в точках на расстоянии  $x_1 = 4,5$  (2) и  $x_2 = 9$  мм (3) от нагреваемой поверхности и на тыльной поверхности (4) образца теплоизоляционного материала



**Рис. 4.** Экспериментальная (1) и аппроксимирующая (2) зависимости, используемые при идентификации теплопроводности по измерению температуры в двух точках

кривая 2), и разность значений температуры  $T_{12}(\Delta x, t) = T(x_1, t) - T(x_2, t)$  (рис. 4),  $\Delta x = x_2 - x_1$ . В этом случае экспериментальная зависимость  $T(x_1, t) = T_1(t)$  аппроксимируется степенной функцией

$$T_1(t) = d_1t + d_2t^2 + d_3t^3.$$

Здесь  $d_i$  — коэффициенты аппроксимационного многочлена, определяемые методом наименьших квадратов из условия

$$\omega(d_i) = \sum_j^M [T_1(t_j) - T_{12}(\Delta x, t_j)]^2 \rightarrow \min,$$

где  $M$  — число узловых точек. Соответствующая расчетная зависимость температуры от времени в точке с координатой  $x_2$ , отстоящей от точки с координатой  $x_1$  на расстоянии  $\Delta x$ , определяется функцией

$$T_2(x_2, t) = T_2(t) = A_1 d_1 t + A_2 d_2 t^2 + A_3 d_3 t^3,$$

где  $A_i$  — коэффициенты [30],

$$\begin{aligned} A_1 &= \left(1 + \frac{1}{2Fo}\right) \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{Fo}} - \frac{1}{\sqrt{\pi Fo}} e^{-1/(4Fo)}; \\ A_2 &= \left(1 + \frac{1}{Fo} + \frac{1}{12Fo^2}\right) \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{Fo}} - \\ &\quad - \left(\frac{5}{3\sqrt{\pi Fo}} + \frac{1}{6\sqrt{\pi Fo^{3/2}}}\right) e^{-1/(4Fo)}; \\ A_3 &= \left(1 + \frac{3}{2Fo} + \frac{1}{4Fo^2} + \frac{1}{120Fo^3}\right) e^{-1/(4Fo)} - \\ &\quad - \left(\frac{11}{5\sqrt{\pi Fo}} + \frac{7}{15\sqrt{\pi Fo^{3/2}}} + \frac{1}{60\sqrt{\pi Fo^{3/2}}}\right) e^{-1/(4Fo)}, \\ &\quad Fo = at / \Delta x. \end{aligned}$$

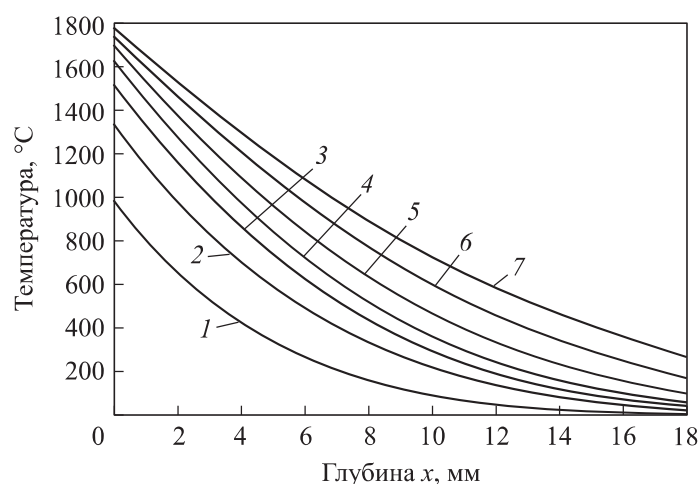
Температуропроводность  $a$  можно определить из решения нелинейного уравнения

$$\omega(a_j) = T_{12}(\Delta x, t_j) - T_2(x_2, t_j) = 0.$$

Здесь  $t_j$  — некоторый момент времени на интервале измерений (нагрева). При некоторой совокупности  $t_j$  можно найти оценку температуропроводности и ее дисперсию (см. (2) и (3)). Согласно результатам измерений  $a = (0,063 \pm 0,0172) \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Это значение близко к ранее найденному значению температуропроводности, полученному по температуре нагреваемой поверхности и в ближней к ней точке с координатой  $x_1$ .

Оценки температуропроводности, полученные по результатам измерений температуры во внутренних точках образца, зависят от точности определения координат установки термопар в высокопористом материале. Так, вариация координат точек установки термопар в пределах  $\pm 0,5$  мм вызывает изменение оценок температуропроводности более чем на 60 %.

Наиболее объективные измерения температуры  $T_h(t)$  соответствуют тыльной поверхности образца, так как при этом обеспечивается существенно более точное задание координаты точки измерения температуры. Если температуропроводность рассматривать как параметр согласования экспериментальных значений температуры поверхности и тыльной стороны образца на некотором временном интервале, то можно, используя соотношение (1), реконструировать пространственно-временное поле температуры образца (рис. 5), а следовательно, и градиента температуры  $\frac{dT(x,t)}{dx}|_{x=h}$  на подложке.



**Рис. 5.** Реконструированное поле температуры в образце для момента времени 100 (1), 150 (2), 200 (3), 250 (4), 300 (5), 350 (6) и 400 с (7)

Используя экспериментальные данные по временной зависимости (рис. 6) теплового потока  $q_h(t)$ , можно получить выборочные значения коэффициента теплопроводности

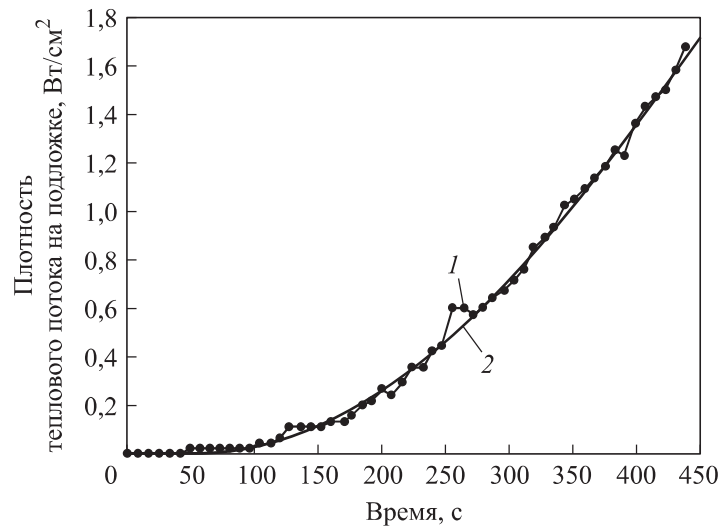
$$\lambda_j(t_j) = q_h(t_j) / \left. \frac{dT(x=h, t_j)}{dx} \right|_{x=h},$$

дать оценку этого искомого параметра

$$\lambda = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \lambda_j$$

и его дисперсии

$$s_\lambda = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\lambda - \lambda_j)^2}.$$



**Рис. 6.** Экспериментальная (1) и аппроксимирующая (2) зависимости плотности теплового потока на подложке от времени

В соответствии с изложенным выше для исследуемого образца получим  $\lambda = 0,317 \pm 0,05$  Вт/(м·К). Это значение хорошо соответствует имеющимся данным по теплопроводности высокопористой керамики из оксида циркония. Коэффициент теплопроводности оксида циркония слабо зависит от значений температуры 1000...1900 °С и составляет 0,465...1,630 Вт/(м·К) при  $\Pi = 23...32$  % и 0,326...0,418 Вт/(м·К) при  $\Pi = 53$  %, а для материала циркар плотностью 320 кг/м<sup>3</sup> ( $\Pi \approx 95$  %), выполненного из волокон оксида циркония, при температуре 2200 °С теплопроводность равна 0,187 Вт/(м·К) [31]. Это хорошо коррелирует с полученной оценкой коэффициента теплопроводности, что может являться подтверждением возможности использования рассмотренной методики для приближенной оценки теплофизических характеристик высокопористых материалов при высоких значениях температуры.

**Заключение.** Предложенный метод оценки теплофизических характеристик высокопористых высокотемпературных теплоизоляционных материалов не связан с выполнением каких-либо жестких условий по параметрам нестационарного нагрева образцов при проведении экспериментальных исследований. Метод основан на объективной экспериментальной информации и позволяет получать экспресс-оценки в широком диапазоне значений температуры, определяемом доступными условиями нагрева.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Полежаев Ю.В. Быть или не быть гиперзвуковому самолету. *Инженерно-физический журнал*, 2000, т. 73, № 1, с. 5–10.
- [2] Sziroczak D., Smith H. A review of design issues specific to hypersonic flight vehicles. *Prog. Aerosp. Sci.*, 2016, vol. 84, pp. 1–28.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.04.001>
- [3] Riley C.J., Kleb W.L., Alter S.J. Aeroheating predictions for X-34 using an inviscid boundary-layer method. *J. Spacecr. Rockets.*, 1999, vol. 36, no. 2, pp. 206–215.  
DOI: <https://doi.org/10.2514/2.3451>
- [4] Дегтярь В.Г., Сон Э.Е. Гиперзвуковые летательные аппараты. М., Янус-К, 2018.
- [5] Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. *Авиационные материалы и технологии*, 2012, № S, с. 7–17.
- [6] Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахнено Ю.А. и др. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов. *Труды ВИАМ*, 2013, № 2.  
URL: [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=8](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=8)
- [7] Сорокин О.Ю., Гращенков Д.В., Солнцев С.С. и др. Керамические композиционные материалы с высокой окислительной стойкостью для перспективных летательных аппаратов. *Труды ВИАМ*, 2014, № 6.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-6-8-8>
- [8] Кац С.М. Высокотемпературные теплоизоляционные материалы. М., Металлургия, 1981.
- [9] Афанасов И.М., Лазорьяк Б.И. Высокотемпературные керамические волокна. М., МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010.
- [10] Тинякова Е.В., Гращенков Д.В. Теплоизоляционный материал на основе мулито-корундовых и кварцевых волокон. *Авиационные материалы и технологии*, 2013, № 3, с. 43–46.
- [11] Зимичев А.М., Соловьева Е.П. Волокно диоксида циркония для высокотемпературного применения. *Авиационные материалы и технологии*, 2014, № 3, с. 55–61.
- [12] Балинова Ю.А., Люлюкина Г.Ю. Волокна диоксида циркония: получение, свойства и перспектива применения. *Современные высокотемпературные волокнистые теплозвукоизоляционные материалы*. М., ВИАМ, 2017, с. 15–30.
- [13] Кашеев И.Д., Демин Е.Н. Новые высокотемпературные теплоизоляционные материалы. *Новые огнеупоры*, 2012, № 3.  
URL: <http://www.spetsogneupor.ru/stati/stati-09-new-materiali.html> (дата обращения: 13.11.2019).
- [14] Бабашов В.Г., Варрик Н.М. Высокотемпературный гибкий волокнистый теплоизоляционный материал. *Труды ВИАМ*, 2015, № 1.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-1-3-3>

- [15] Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. М., Химия, 1982.
- [16] Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л., Энергия, 1974.
- [17] Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. Л., Энергоатомиздат, 1991.
- [18] Платунов Е.С., ред. Теплофизические измерения и приборы. Л., Машиностроение, 1986.
- [19] Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. Л., Энергия, 1973.
- [20] Бессонов А.Ф. Установки для высокотемпературных комплексных исследований. М., Машиностроение, 1974.
- [21] Веб-сайт компании NETZSCH. URL: <https://www.netzsch.com/en/> (дата обращения: 13.11.2019).
- [22] Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., et al. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity. *J. Appl. Phys.*, 1961, vol. 32, iss. 9, pp. 1679–1683. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1728417>
- [23] Жданов В.С., Иванов М.В., Михеев И.В. и др. Способ определения коэффициента теплопроводности материалов. Патент SU 873087. Заявл. 30.11.1979, опубл. 15.10.1981.
- [24] Коздоба Л.А., Круковский П.Г. Методы решения обратных задач теплопереноса. Киев, Наукова думка, 1982.
- [25] Бек Дж., Блакуэлл Б., Сент-Клэр Ч. мл. Некорректные обратные задачи теплопроводности. М., Мир, 1989.
- [26] Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Ненарокомов А.В. Обратные задачи в исследовании сложного теплообмена. М., Янус-К, 2009.
- [27] Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. М., ЛКИ, 2009.
- [28] Крылов В.И., Томак В.И., Ягодников Д.А. и др. Устройство для газопламенной обработки образцов материалов. Патент РФ 2429299. Заявл. 06.07.2010, опубл. 20.09.2011.
- [29] Лыков А.В. Теория теплопроводности. М., Высш. шк., 1967.
- [30] Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. М., Энергия, 1976.
- [31] Мармер Э.Н., Гурвич О.С., Мальцева Л.Ф. Высокотемпературные материалы. М., Металлургия, 1967.

**Томак Виктор Иванович** — канд. техн. наук, заведующий отделом НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Бурков Андрей Сергеевич** — научный сотрудник НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Рыцарев Андрей Михайлович** — ведущий инженер НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Товстоног Валерий Алексеевич** — д-р техн. наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Томак В.И., Бурков А.С., Рыцарев А.М. и др. Экспериментальная оценка теплофизических характеристик высокотемпературных теплоизоляционных материалов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2020, № 2 (89), с. 99–116. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-2-99-116>

**EXPERIMENTAL EVALUATION OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF HIGH-TEMPERATURE THERMAL INSULATION MATERIALS**

**V.I. Tomak**

**A.S. Burkov**

**A.M. Rytsarev**

**V.A. Tovstonog**

[mgtu-e14@mail.ru](mailto:mgtu-e14@mail.ru)

[tovstonog@bmstu.ru](mailto:tovstonog@bmstu.ru)

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

One of the most important problems in the development of advanced products of aerospace engineering and highly efficient power plants is to make high-temperature structural, heat-shielding and heat-insulating materials with extremely high operating temperatures of 2000–2500 °C. Even for prototype models, it is necessary to make a qualitative breakthrough in the field of materials science and the production of new high-temperature composite and heat-insulating materials which provide thermal protection and the permissible temperature conditions of structural elements at high temperatures. The practical application of the developed materials requires an evaluation of the whole body of their physicomachanical, optical, and thermophysical characteristics, which

**Keywords**

*Thermal conductivity, thermal diffusivity, temperature, thermal insulation materials, experimental methods, multi-nozzle torch*

evaluation of the whole body of their physicomachanical, optical, and thermophysical characteristics, which can only be done in experimental studies. We developed the design of the experimental setup and the methodology for the approximate evaluation of the thermophysical characteristics of highly porous heat-insulating materials at temperatures up to 2000 °C. A propane / oxygen or acetylene / oxygen multi-nozzle torch serves as a heating source for samples with a characteristic size of up to 50 × 50 mm. The paper substantiates the methodology for processing the measurement results in order to determine the thermophysical characteristics, and gives the results of a study of the thermal conductivity of highly porous zirconium oxide-based material

Received 13.11.2019

Accepted 25.12.2019

© Author(s), 2020

---

## REFERENCES

- [1] Polezhaev Yu.V. Will there or will there not be a hypersonic airplane? *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 2000, vol. 73, iss. 1, pp. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02681670>
- [2] Szirczak D., Smith H. A review of design issues specific to hypersonic flight vehicles. *Prog. Aerosp. Sci.*, 2016, vol. 84, pp. 1–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.04.001>
- [3] Riley C.J., Kleb W.L., Alter S.J. Aeroheating predictions for X-34 using an inviscid boundary-layer method. *J. Spacecr. Rockets.*, 1999, vol. 36, no. 2, pp. 206–215. DOI: <https://doi.org/10.2514/2.3451>
- [4] Degtyar V.G., Son E.E. *Giperzvukovye letatel'nye apparaty [Hypersonic aircraft]*. Moscow, Yanus-K Publ., 2018.
- [5] Kablov E.N. Strategic areas of developing materials and their processing technologies for the period up to 2030. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii [Aviation Materials and Technologies]*, 2012, no. S, pp. 7–17 (in Russ.).
- [6] Kablov E.N., Shchetanov B.V., Ivakhnenko Yu.A., et al. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers — perspective materials. *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*, 2013, no. 2 (in Russ.). Available at: [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=8](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=8)
- [7] Sorokin O.Yu., Grashchenkov D.V., Solntsev S.S., et al. Ceramic composite materials with high oxidation resistance for the novel aircrafts (review). *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*, 2014, no. 6 (in Russ.). DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-6-8-8>
- [8] Kats S.M. *Vysokotemperaturnye teploizolyatsionnye materialy [High-temperature thermoinsulating materials]*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981.
- [9] Afanasov I.M., Lazoryak B.I. *Vysokotemperaturnye keramicheskie volokna*. Moscow, Lomonosov MSU Publ., 2010.



- [10] Tinyakova E.V., Grashchenkov D.V. Heat insulating material based on mullite-corundum and quartz fibers. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2013, no. 3, pp. 43–46 (in Russ.).
- [11] Zimichev A.M., Solov'yeva E.P. Zirconia fiber for high temperature application (review). *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2014, no. 3, pp. 55–61 (in Russ.).
- [12] Balinova Yu.A., Lyulyukina G.Yu. [Fibers of zirconium dioxide: synthesis, properties and application prospects]. *Sovremennye vysokotemperaturnye voloknistye teplozvukoizolyatsionnye materialy* [Modern high-temperature fibrous heat insulators]. Moscow, VIAM Publ., 2017, pp. 15–30 (in Russ.).
- [13] Kashcheev I.D., Demin E.N. New high temperature heat insulators. *Novye ognepory*, 2012, no. 3 (in Russ.). Available at: <http://www.spetsogneupor.ru/stati/stati-09-new-materiali.html> (accessed: 13.11.2019).
- [14] Babashov V.G., Varrik N.M. High-temperature flexible fibrous insulation material. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2015, no. 1 (in Russ.). DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-1-3-3>
- [15] Kheyfets L.I., Neymark A.V. Mnogofaznye protsessy v poristyykh sredakh [Multi-phase processes in porous medium]. Moscow, Khimiya Publ., 1982.
- [16] Dul'nev G.N., Zarichnyak Yu.P. Teploprovodnost' smesey i kompozitsionnykh materialov [Heat conductivity of mixtures and composites]. Leningrad, Energiya Publ., 1974.
- [17] Dul'nev G.N., Novikov V.V. Protsessy perenosa v neodnorodnykh sredakh [Transfer processes in inhomogeneous medium]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1991.
- [18] Platunov E.S., ed. Teplofizicheskie izmereniya i pribory [Thermal-physical measurements and devices]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986.
- [19] Platunov E.S. Teplofizicheskie izmereniya v monotonnom rezhime [Thermal-physical measurements in monotonous regime]. Leningrad, Energiya Publ., 1973.
- [20] Bessonov A.F. Ustanovki dlya vysokotemperaturnykh kompleksnykh issledovaniy [Plant for complex high-temperature study]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974.
- [21] Website of NETZSCH company. Available at: <https://www.netzsch.com/en/> (accessed: 13.11.2019).
- [22] Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., et al. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity. *J. Appl. Phys.*, 1961, vol. 32, iss. 9, pp. 1679–1683. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1728417>
- [23] Zhdanov V.S., Ivanov M.V., Mikheev I.V., et al. Sposob opredeleniya koeffitsienta teploprovodnosti materialov [Method for definition of thermal conductivity coefficient of materials]. Patent SU 873087. Appl. 30.11.1979, publ. 15.10.1981 (in Russ.).
- [24] Kozdoba L.A., Krukovskiy P.G. Metody resheniya obratnykh zadach teploperenosa [Solving methods for inverse heat transfer problems]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1982.
- [25] Beck J.V., Blackwell B., St. Clair Ch.R. Jr. Inverse heat conduction. Ill-posed problems. Wiley-Interscience, 1985.

- [26] Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Nenarokomov A.V. *Obratnye zadachi v issledovanii slozhnogo teploobmena* [Inverse problems in study of complex heat exchange]. Moscow, Yanus-K Publ., 2009.
- [27] Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. *Chislennye metody resheniya obratnykh zadach matematicheskoy fiziki* [Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics]. Moscow, LKI Publ., 2009.
- [28] Krylov V.I., Tomak V.I., Yagodnikov D.A., et al. *Ustroystvo dlya gazoplamennoy obrabotki obraztsov materialov* [Device for flame processing of material samples]. Patent RU 2429299. Appl. 06.07.2010, publ. 20.09.2011 (in Russ.).
- [29] Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Heat conductivity theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967.
- [30] Polezhaev Yu.V., Yurevich F.B. *Teplovaya zashchita* [Thermal protection]. Moscow, Energiya Publ., 1976.
- [31] Marmer E.N., Gurvich O.S., Mal'tseva L.F. *Vysokotemperaturnye materialy* [High-temperature materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1967.

**Tomak V.I.** — Cand. Sc. (Eng.), Head of Department, Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Burkov A.S.** — Researcher, Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Rytsarev A.M.** — Lead Engineer, Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Tovstonog V.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Professor of Spacecrafts and Launch Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Tomak V.I., Burkov A.S., Rytsarev A.M., et al. Experimental evaluation of thermophysical characteristics of high-temperature thermal insulation materials. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2020, no. 2 (89), pp. 99–116 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-2-99-116>