

УДК 533.21

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОРИСТЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Л. Я. ПАДЕРИН, Б. В. ПРУСОВ, О. Д. ТОКАРЕВ

Работа посвящена совершенствованию метода исследования теплопроводности пористых теплоизоляционных материалов и модернизации экспериментальной установки с целью повышения уровня максимальных температур. В рамках модернизации установки разработано новое измерительное устройство на основе современных высокотемпературных материалов, что позволило повысить уровень максимальной температуры исследуемых образцов при измерениях эффективного коэффициента теплопроводности от 1500 до 1825 К. Измерения проведены в вакууме и газовой среде в диапазоне давления $p = 10^0 \div 10^5$ Па. Результаты измерений представлены в виде температурных и барометрических зависимостей эффективных коэффициентов теплопроводности двух исследованных материалов.

Ключевые слова: пористый теплоизоляционный материал, температура, тепловой поток, эффективный коэффициент теплопроводности.

Пористые теплоизоляционные материалы широко используются в системах теплозащиты высокотемпературных конструкций, в том числе гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА) [1, 2]. В рассматриваемых материалах имеют место все три существующих вида теплопереноса: контактно-кондуктивный через твердую фазу, составляющую каркас материала, кондуктивный, конвективный и радиационный переносы в порах через газовую фазу в системе газ — твердая фаза. Вклад каждого из перечисленных видов в суммарном теплопереносе зависит от химического состава, физической структуры материала, уровня и градиента температуры в материале, состава и давления газовой среды, в которой используется материал. К настоящему времени выполнен



ПАДЕРИН
Леонид Яковлевич
доктор технических наук,
главный научный
сотрудник ЦАГИ



ПРУСОВ
Борис Викторович
ведущий
инженер ЦАГИ



ТОКАРЕВ
Олег Дмитриевич
кандидат физико-
математических наук,
ведущий научный
сотрудник ЦАГИ

большой объем как теоретических, так и экспериментальных исследований, посвященных теплопереносу в пористых материалах, определению их теплопроводности и отдельных ее компонентов [3 — 6]. Однако из-за сложности структуры исследуемых материалов и происходящих в них физических процессов как при создании математических моделей, так и при проведении расчетов используются многочисленные упрощающие допущения. Они существенно снижают адекватность моделей и получаемых результатов реальным физическим процессам. В связи с перечисленными трудностями, в практике современных инженерных расчетов теплоперенос в элементах конструкций, изготовленных из пористых материалов, оценивается, в основном, путем численных расчетов стандартных уравнений теплопроводности, в которых используются полученные экспериментальными методами эффективные значения коэффициентов теплопроводности материалов. При этом учитываются все три составляющие компоненты теплопереноса.

Специфика и сложность экспериментальных исследований эффективной теплопроводности пористых теплоизоляционных материалов обусловлена, главным образом, наличием перечисленных выше составляющих комбинированного теплопереноса, а также низкими значениями и существенно нелинейным характером зависимости эффективных коэффициентов теплопроводности от температуры и давления окружающей газовой среды. Из-за отсутствия эталонных материалов рассматриваемого типа в экспериментальных исследованиях практически неприменимы относительные методы.

Наиболее широко применяется стационарный метод, в котором используется нагреваемая пластина с компенсацией тепловых утечек от основного нагревателя и плоских исследуемых образцов. При этом в исследуемых образцах создается одномерный тепловой поток между нагреваемой и охлаждаемой сторонами. Измерительное устройство помещается в камеру с контролируемым составом и давлением газовой среды, что позволяет исследовать ее влияние на теплоперенос в материале. В известных работах, в частности, [7 — 10] описаны варианты метода и экспериментальных установок, в которых максимальная температура исследуемых образцов достигает 1500 К в вакууме, воздушной и инертной газовых средах.

МЕТОД И УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОРИСТЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В данной работе предложены новая версия метода и новый вариант экспериментальной установки, предназначенные для исследований эффективной теплопроводности пористых теплоизоляционных материалов в диапазонах температуры $T = 500 \div 1825$ К и давления окружающей газовой среды $p = 10^0 \div 10^5$ Па. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Основу установки составляет вакуумная камера, в которой располагается измерительное устройство. Оно состоит из системы плоских регулируемых омических нагревателей, металлических пластин и фрагментов теплоизоляции. Основные нагреватели № 1, 2, 5 обеспечивают заданные значения средней температуры и разность температур по толщине двух идентичных исследуемых образцов, расположенных симметрично относительно нагревателя № 1. Компенсационные боковые нагреватели № 3, 4 и 6 совместно с боковой теплоизоляцией позволяют практически полностью ликвидировать тепловые утечки от образцов и нагревателя № 1 и тем самым создают одномерный тепловой поток в образцах. Между основными нагревателями и образцами, а также между компенсационными нагревателями и изоляцией прокладываются препарированные термopарами металлические пластины. На каждой пластине установлено от 4 до 6 термопар. По результатам измерений температур пластин определяются температуры поверхностей образцов, примыкающих к пластинам.

Исследуемые образцы, нагреватели № 1, 2, 5 и установленные между ними металлические пластины имеют квадратную форму со стороной 0.15 м, толщина образцов h м. Боковые нагреватели № 3, 4, 6 и примыкающие к ним металлические пластины, а также теплоизоляция между ними выполнены в виде квадратных рамок с внутренними и наружными размерами соответственно 0.15 м и 0.24 м. Толщина боковой теплоизоляции равна толщине исследуемых образцов. Система, состоящая из образцов, нагревателей, металлических пластин и теплоизоляции,

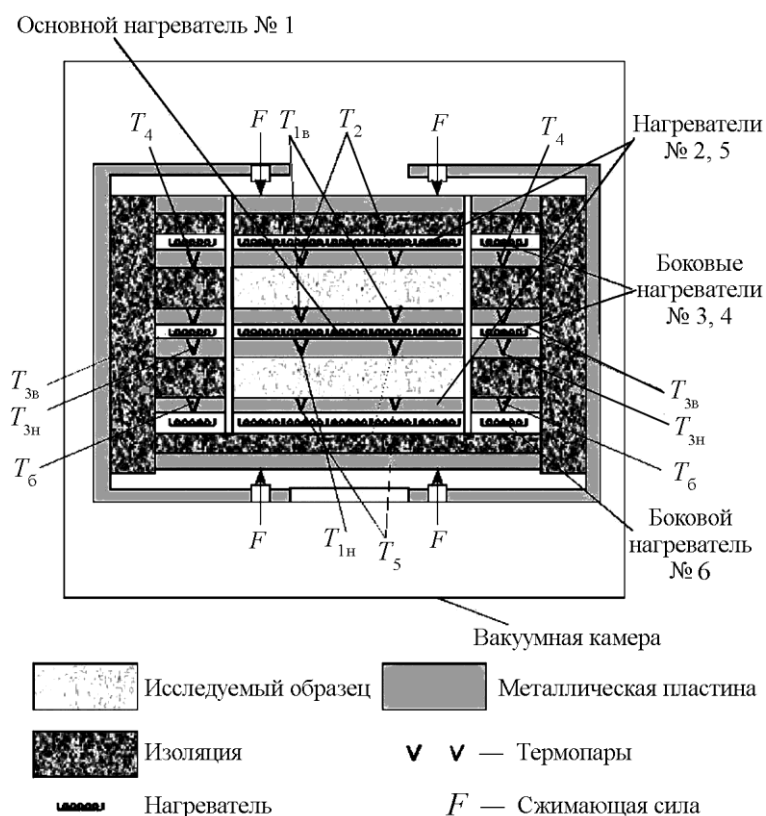


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследований теплопроводности пористых теплоизоляционных материалов

обкладывается снаружи (по боковой, нижней и верхней поверхностям) дополнительными слоями теплоизоляции. Их толщина равна 0.05 м у боковой поверхности и 0.02 м у верхней и нижней поверхностей.

Перечисленные элементы — образцы, нагреватели и фрагменты теплоизоляции — устанавливаются на раме, снабженной винтовым сжимающим устройством, выполняющим двойную функцию. Во-первых, оно стабилизирует контакты металлических пластин с образцами и нагревателями. Во-вторых, при исследованиях деформируемых материалов, например ваты, оно обеспечивает заданные толщину и плотность образцов. Сжимающее устройство позволяет варьировать толщину образцов в диапазоне $h = 0.005 \div 0.05$ м.

В состав инфраструктуры установки входят следующие системы:

- а) система электропитания, обеспечивающая автономную регулируемую работу шести омических нагревателей в автоматическом или ручном режимах управления;
- б) система охлаждения стенок вакуумной камеры проточной водой;
- в) система вакуумирования и контролируемого напуска газов (воздуха, азота, углекислого газа, инертного газа) в камеру, обеспечивающая заданные состав и давление газовой среды в камере в диапазоне $p = 10^0 \div 10^5$ Па;
- г) информационно-измерительная система, включающая средства измерения температур (до 50 термодатчиков), давления газовой среды в камере, мощности нагревателей, а также ЭВМ для обработки экспериментальной информации и управления мощностью нагревателей в автоматическом режиме;

д) контрольно-измерительное оборудование для индивидуальных градуировок средств измерения температуры, давления газовой среды в камере и мощности нагревателей; градуировки перечисленных средств измерений проводятся практически в каждой серии испытаний.

В процессе подготовки испытаний осуществляется монтаж собранного измерительного устройства в вакуумной камере, его подключение к системам электропитания, измерения температур

и мощности нагревателя № 1, герметизация вакуумной камеры и создание в ней заданных состава и давления газовой среды.

После стабилизации давления газовой среды в камере включаются нагреватели, которые с помощью автоматической системы регулирования обеспечивают контролируемый нагрев металлических пластин до заданных температур в стационарном режиме. Мощность нагревателя № 1 регулируется индивидуально в режиме ручного управления. Таким образом, поддерживаются равенство средних температур металлических пластин $T_{1в} = T_{3в}$, $T_{1н} = T_{3н}$, $T_2 = T_4$, $T_5 = T_6$ и заданные разности температур в образцах $\Delta T_в = T_{1в} - T_2$, $\Delta T_н = T_{1н} - T_5$, причем $\Delta T_в \approx \Delta T_н \leq 100$ К, где индексы 1 — 6 относятся к металлическим пластинам, примыкающим к соответствующим нагревателям; индексы «в», «н» относятся соответственно к верхним и нижним пластинам, примыкающим к нагревателям № 1, 3. При этом в камере устанавливается и поддерживается заданное давление газовой среды.

В процессе испытаний при нагреве и установлении стационарного теплового режима на монитор ЭВМ выводятся текущие значения всех измеряемых термопарами температур. Режим считается стационарным, когда стабилизируются показания всех термопар, а электрическая мощность N_1 , подводимая к основному нагревателю № 1, и давление в камере поддерживаются постоянными в пределах инструментальных погрешностей измерений. После этого регистрируются показания всех приборов и осуществляется переход к следующему температурному режиму.

Имея в виду, что в реальных конструкциях полная ликвидация тепловых утечек невозможна, конструкция измерительного устройства, методика испытаний и их информационное обеспечение позволяют не только контролировать и минимизировать тепловые утечки от нагревателя № 1, но при необходимости и оценить их. Возможны два типа тепловых утечек: через боковую теплоизоляцию $q_{ут1}$ и по коммутационным проводам, соединяющим нагреватель с внешней цепью электропитания $q_{ут2}$. Эти тепловые утечки оцениваются в каждом эксперименте и учитываются при расчете тепловых потоков, проходящих через образцы.

Эффективный коэффициент теплопроводности λ_{eff} исследуемого материала определяется на стационарном тепловом режиме из соотношения

$$\lambda_{eff} = qh / (S \Delta T_в + \Delta T_н), \quad (1)$$

в котором q — тепловой поток, прошедший через образцы; S — площадь поперечного сечения образца; величина $q = N_1 - q_{ут1} - q_{ут2}$.

Как следует из описания метода, основными фрагментами установки, определяющими температурный диапазон исследований, являются применяемые в измерительном устройстве нагреватели, металлические пластины, теплоизоляция и термопары. Из соображений оптимизации параметров установки для конкретных программ испытаний и экономической целесообразности в настоящее время существуют и используются два варианта установки.

Первый (первоначальный) вариант установки позволяет проводить исследования в диапазонах температур $T = 600 \div 1500$ К и давления воздуха $p = 10^0 \div 10^5$ Па. В ней применяются нихромовые нагреватели, металлические пластины из нержавеющей стали, теплоизоляция из волокнистого материала на основе окиси кремния (ТЗМК), хромель-алюмелевые термопары. Подробное описание установки и результаты испытаний представлены в [10].

При создании второго варианта установки, предназначенной для исследований при повышенных максимальных температурах исследуемых образцов $T > 1500$ К, проведена существенная модернизация экспериментальной установки. При этом в конструкцию измерительного устройства внесены следующие изменения: новые нагреватели, изготовленные из углеродного композиционного материала; металлические пластины, изготовленные из молибдена; вольфрам-рениевые термопары; фрагменты теплоизоляции, изготовленной из волокон на основе смеси окислов алюминия и кремния.

В рамках модернизации инфраструктуры установки адаптированы к новым режимам испытаний следующие системы: система электропитания, система охлаждения проточной водой стенок камеры, системы вакуумирования и напуска газов (воздуха, азота, углекислого газа, аргона), позволяющие воспроизводить в камере составы и давление газовых сред в атмосферах Земли, Марса, Венеры. Обновлена информационно-измерительная система, обеспечивающая в полном объеме компьютерное и программное сопровождение проводимых исследований.

На установке возможно воспроизведение в образцах как стационарных, так и динамических режимов при различных пространственных и временных градиентах температуры в образцах. Это позволяет наряду с измерениями эффективного коэффициента теплопроводности в расширенных диапазонах температур исследовать:

а) влияние структурных параметров исследуемых материалов, а также внутренних температурных градиентов на суммарный теплоперенос и его отдельные компоненты;

б) вклад газовой составляющей в суммарный теплоперенос в материалах в зависимости от температуры, состава и давления газовой среды;

в) степень достоверности результатов определения эффективных коэффициентов теплопроводности материалов, полученных с применением новых теоретических или эмпирических подходов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Проведены две серии испытаний, в которых определены температурные зависимости эффективных коэффициентов теплопроводности двух волокнистых теплоизоляционных материалов в вакууме и азотной среде в диапазоне давления $p = 10^0 \div 10^5$ Па. Материал 1 изготовлен из волокон на основе окисла алюминия с добавлением окисла кремния, аналогичный по структуре материал 2 изготовлен из волокон на основе окисла кремния (без примесей). Исследуемые образцы имели одинаковую плотность $\rho = 120 \text{ кг/м}^3$. Результаты испытаний представлены на рис. 2 в виде температурных зависимостей эффективных коэффициентов теплопроводности $\lambda_{\text{eff}} = f(T)$ в вакууме и азотной среде при атмосферном давлении. На рис. 3 результаты испытаний представлены в виде барометрических зависимостей $\lambda_{\text{eff}} = f(\lg p)$ при постоянных температурах исследованных материалов. Температурные зависимости для материала 1 получены в диапазоне $T = 550 \div 1825 \text{ К}$ в условиях вакуума и в диапазоне $T = 550 \div 1725 \text{ К}$ при атмосферном давлении.

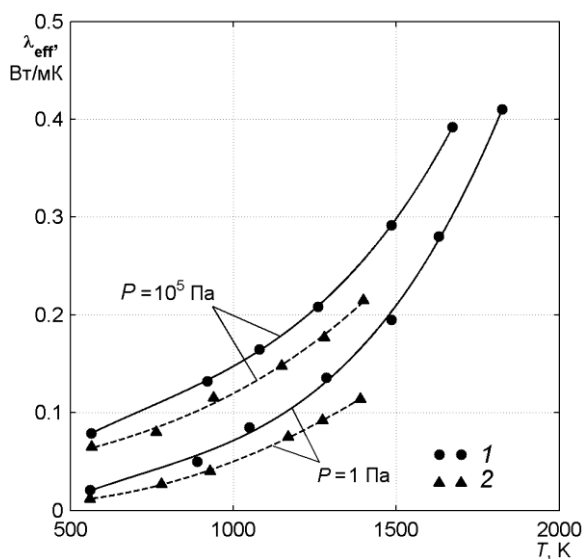


Рис. 2. Температурные зависимости эффективных коэффициентов теплопроводности:

1 — материал 1; 2 — материал 2

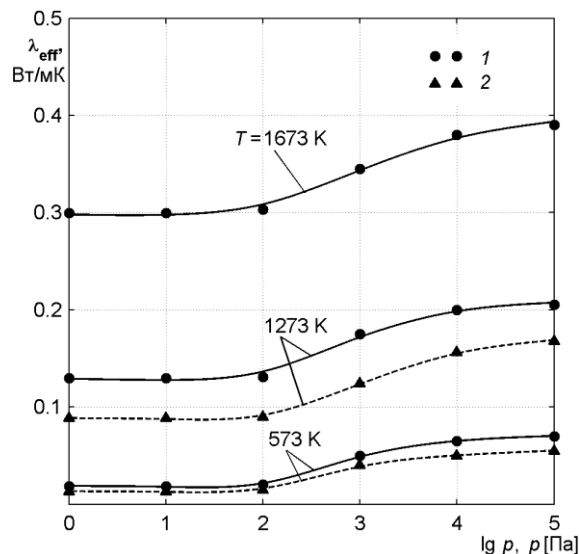


Рис. 3. Барометрические зависимости эффективных коэффициентов теплопроводности:

1 — материал 1; 2 — материал 2

Для материала 2 аналогичные зависимости получены в диапазоне $T = 550 \div 1425$ К. Ограничения максимальных значений температуры образцов обусловлены термостойкостью исследованных материалов. Из представленных на рис. 2 данных следует, что значения λ_{eff} для обоих материалов монотонно возрастают (в виде нелинейных функций) с ростом температуры и давления газовой среды в камере. При этом значения λ_{eff} материала 1 выше, чем материала 2 в 1.25 — 1.45 раза в вакууме и в 1.2 — 1.25 при атмосферном давлении. Увеличение λ_{eff} с ростом температуры объясняется главным образом интенсификацией радиационной составляющей теплопереноса в материалах с ростом температуры и газовой составляющей теплопереноса с ростом давления газовой среды. В частности, в условиях вакуума в исследованных температурных диапазонах величина λ_{eff} материала 1 увеличилась в 18 раз, материала 2 — в 6.5 раза, а при атмосферном давлении азота наблюдались аналогичные увеличения λ_{eff} соответственно в 5.5 раза для материала 1 и в 3 раза для материала 2. Анализ барометрических зависимостей, представленных на рис. 3, показывает, что основной рост коэффициентов эффективной теплопроводности материалов в газовой среде происходит в диапазоне давлений $p = 10^2 \div 10^5$ Па, где величина λ_{eff} возрастает в 4.1, в 1.5 и в 1.3 раза при температурах $T = 573, 1273$ и 1673 К для материала 1. Для материала 2 величина λ_{eff} возрастает в 4.4 и в 1.9 раза при температурах $T = 573, 1273$ К соответственно. Следовательно, относительный вклад газовой составляющей теплопереноса в исследованных материалах уменьшается с ростом температуры. В частности, по сравнению с вакуумом эта часть составляет 0.75, 0.35 и 0.3 при температурах $T = 573, 1273$ и 1673 К для материала 1, а для материала 2 — 0.77, 0.48 при температурах $T = 573, 1273$ К соответственно.

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Как следует из соотношения (1), относительные погрешности измерений эффективных коэффициентов теплопроводности ($\delta\lambda$) зависят от погрешностей определения следующих величин: (δq) — теплового потока, прошедшего через образцы; $\delta \Delta T_{\text{в}} + \Delta T_{\text{н}}$ — суммы разностей температур в образцах; (δh) — толщины образцов; (δS) — площади поперечного сечения образцов и определяются из соотношения:

$$\delta\lambda_{\text{eff}} = \delta q^2 + [\delta \Delta T_{\text{в}} + \Delta T_{\text{н}}]^2 + \delta h^2 + \delta S^2^{1/2}. \quad (2)$$

Методика расчетов перечисленных погрешностей изложена в [10]. В результате расчетов получены следующие величины погрешностей: $\delta q \leq 2.6\%$, $\delta \Delta T_{\text{в}} + \Delta T_{\text{н}} \leq 6\%$, $\delta h \leq 0.34\%$, $\delta S \leq 0.7\%$. Таким образом, максимальные погрешности определения эффективных коэффициентов теплопроводности образцов не превышали 6.6%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена модернизация экспериментальной установки, предназначенной для исследований теплопереноса и эффективных коэффициентов теплопроводности пористых теплоизоляционных материалов. При этом достигнуто повышение максимальной температуры образцов от 1500 до 1825 К.

Проведены две серии испытаний, в которых определены температурные и барометрические зависимости эффективных коэффициентов теплопроводности двух волокнистых теплоизоляционных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-08-00191а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Rasky D. I. Thermal protection systems for future reusable launch vehicles // SAE Technical Paper N 951618, 25 ICES. — San-Diego, California, July 10 — 13, 1995, p. 1 — 10.
2. Myers David E. et al. Parametric weight comparison of advanced metallic, ceramic tile and ceramic blanket thermal protection systems // NASA / TM-2000 210289, 2000, p. 1 — 44.
3. Спэрроу Э. М., Сесс Р. Д. Теплообмен излучением. — Л.: Энергия, 1971.
4. Костылев В. М. Макроскопическая кинетика фотонного газа. Радиационный теплообмен в дисперсных средах. — М.: Машиностроение, 2000.
5. Yien W. W. Heat transfer by conduction and radiation in one-dimensional absorbing, emitting and anisotropically scattering medium // J. of Heat Transfer. 1980. V. 102, p. 303 — 307.
6. Shmitt R. I. et al. The infrared properties of reusable insulations // AIAA Paper 73-745. 1973.
7. Goldstein H. E. et al. Silica reusable insulation improvement research // Symposium on Reusable Surface Insulation for Space Shuttle. V. 1, NASA TM X-2719, 1973, p. 155 — 196.
8. Харламов Ф. Г. Измерения теплопроводности твердых тел. — М.: Атомиздат, 1973.
9. Banas R. P. et al. Determination of effective thermal conductivity for space shuttle orbiter reusable surface insulation // AIAA Paper 74-730. 1974.
10. Ebeling W. D., Fischer W. P. P., Antonenko I. (DASA, Germany), Paderin L. (TsAGI, Russia). Thermal conductance of ceramic insulation blankets for re-entry vehicle // SAE Technical Paper № 9511577, 25 ICES. — San-Diego, California, July, 10 — 23, 1995.

Рукопись поступила 4/VIII 2010 г.