

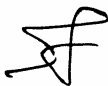
Анучин Сергей Александрович

ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
КВАРЦЕВОЙ КЕРАМИКИ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ТЕПЛОВЫХ
ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and strokes, located at the bottom left of the page.

Работа выполнена в ОАО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Резник Сергей Васильевич

Официальные оппоненты:

Плаксин Олег Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент, Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского», начальник отдела б



Черепанов Валерий Вениаминович, доктор технических наук, доцент, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), профессор кафедры физики

Ведущая организация:

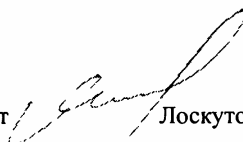
Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

Защита состоится «10» июня 2015 г. в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.17, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по адресу: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д.2, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по адресу: 105005 г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5 и на сайтах www.bmstu.ru, www.bmstu-kaluga.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Лоскутов Сергей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В новых проектах летательных аппаратов (ЛА) предусматривается использование перспективных материалов, рассчитанных на работу при температурах до 2500 К и скоростях нагрева до 100 К/с. Создание высокотеплонагруженных элементов конструкций ЛА нового поколения предполагает тщательный отбор конструкционных материалов с детальным изучением их свойств, в том числе коэффициента теплопроводности.

Широко используемым материалом для производства высокотеплонагруженных элементов конструкций является кварцевая керамика, имеющая достаточно высокую прочность и термостойкость. Особенностью кварцевой керамики является частичная прозрачность материала, приводящая к зависимости теплопроводности от условий теплообмена. Например, различие между коэффициентом теплопроводности, определённым в стационарных и нестационарных условиях теплообмена, может достигать 100 % при высоких температурах. При этом температура внутренней поверхности элементов конструкций из кварцевой керамики, рассчитанная для различной теплопроводности, может изменяться на 200 К.

Другой особенностью кварцевой керамики является склонность к кристаллизации при длительном нагреве до температуры выше 1400 К с образованием кристобалита, сопровождающемся изменением диэлектрических и теплофизических свойств (ТФС) материала.

Традиционные методы определения теплопроводности основаны на стационарном тепловом режиме экспериментального образца и отличаются большой длительностью эксперимента (десять часов). Экспериментальное определение теплопроводности при стационарном тепловом режиме может давать завышенные данные. От точности определения коэффициента теплопроводности зависят как весовые, габаритные и прочностные характеристики проектируемого изделия, так и работоспособность радиотехнической аппаратуры.

Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью определения коэффициента теплопроводности кварцевой керамики в тепловых условиях, приближенных к условиям эксплуатации материала в изделии.

Тема диссертационной работы отвечает следующим целевым программам и научно-исследовательским работам:

- Федеральной целевой программе по подгруппе материалов «Керамика специального и общего назначения» на 2009 – 2015 гг.
- Федеральной целевой программе «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002-2010 годы и на период до 2015 года».
- Федеральной целевой программе «Техническое перевооружение производственных мощностей по выпуску радиопрозрачных материалов на основе нитрида кремния; ударопрочных материалов на основе карбидов кремния и бора; исходных порошков из диоксида циркония; твердых электролитов для датчиков кислорода из материалов на основе оксида циркония; теплоизоляционных материалов; кремнийорганических соединений»

- Плану работ, проводимых в ОАО ОНПП «Технология» в соответствии с приказом Ростехнологии от 29.10.2003 г. № 246, согласно которому предприятие выполняет задачи по разработке технологий изготовления и поставке наукоемких высокоэффективных конструкций из нового поколения термостойких полимерных композиционных материалов (стеклопластиков, углепластиков), конструкционной керамики и стеклообразных материалов для современной и перспективной авиационно-космической техники.

Целью работы является исследование физической природы температурной зависимости коэффициента теплопроводности кварцевой керамики при интенсивных тепловых воздействиях для повышения точности проектирования перспективных ЛА.

Для достижения цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработаны методики теплофизических исследований образцов кварцевой керамики при интенсивных тепловых воздействиях, выбраны форма и размер экспериментальных образцов, скорости нагрева и продолжительность эксперимента.

2. Оценена погрешность определения теплопроводности керамических материалов с помощью контрольных испытаний образцовых материалов и теоретического анализа погрешности измерения температуры контактными датчиками.

3. Разработаны программные средства для автоматизированного комплекса по получению экспериментальных теплофизических характеристик керамических материалов.

4. Постановлены и проведены эксперименты с образцами кварцевой керамики в диапазоне температур 300 – 1700 К и скоростей нагрева до 50 К/с и установлены закономерности изменения теплопроводности кварцевой керамики.

Научная новизна работы

1. Разработана методика теплофизических исследований образцов керамических материалов, позволяющая исследовать их ТФС стационарными и нестационарными методами в диапазоне температур 300 – 1700 К и скоростей нагрева до 50 К/с.

2. Выявлена физическая природа изменения коэффициента теплопроводности частично прозрачных керамических материалов, связанная с различным вкладом радиационного переноса в экспериментальных образцах при различных скоростях нагрева.

3. Выявлена степень влияния погрешности измерения температуры в экспериментальных образцах на результаты определения коэффициента теплопроводности керамических материалов для различных схем установки датчиков.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечена совпадением экспериментальных данных, полученных в настоящей работе для образцовых материалов, со справочными данными и результатами других авторов при стационарных условиях теплообмена, использованием стандартных вычислительных алгоритмов и программ, аттестованных средств измерения температуры.

Предмет исследования – взаимозависимости теплопроводности кварцевой керамики от температуры и интенсивности теплового воздействия.

Объектами исследования в работе являлись образцы материала обтекателей головных частей ракет – кварцевой керамики. В качестве образцового материала использовано стекло кварцевое оптическое марки КВ.

Границами исследования являются вопросы, связанные с изучением теплофизических, оптических и структурных свойств кварцевой керамики.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- созданы автоматизированные средства и разработана методика определения важнейшей физической характеристики образцов керамических материалов – теплопроводности, снижающие влияние человеческого фактора на результаты испытаний и позволяющие сократить затраты времени и средств на подготовку и проведение испытаний и трудоёмкость обработки экспериментальных данных, увеличивающие удобство обработки и анализа результатов;

- получены данные по коэффициенту теплопроводности кварцевой керамики в более широком, чем было достигнуто ранее, диапазоне температур (300 – 1700) К и скоростях нагрева до 50 К/с.

Результаты диссертационной работы можно использовать на предприятиях, проектирующих и изготавливающих изделия ракетно-космической техники: федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина», филиал федерального государственного унитарного предприятия «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» г. Калуга, в ГНЦ РФ ОАО «ОНПП «Технология», а также в учебных целях в ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана». Практическая значимость результатов подтверждается их применением при паспортизации существующих и вновь разрабатываемых материалов, а новые данные о температурной зависимости коэффициента теплопроводности используются при проектировании перспективных ЛА.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследования, планировании и проведении экспериментов, разработке алгоритмов, написании компьютерных программ, обработке результатов измерений, анализе и обобщении полученной информации. Все основные результаты и выводы получены лично автором, а также в сотрудничестве с научным руководителем. Заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Защищаемые положения:

- методика исследования теплопроводности керамических материалов стационарными и нестационарными методами в диапазоне температур (300 – 1700) К и скоростей нагрева от 0 до 50 К/с;

- структура и схемные решения управляющих программных модулей автоматизированного комплекса теплофизических исследований керамических материалов;

- выявленная степень влияния способа заделки термопар в экспериментальные образцы на результат определения теплопроводности керамических материалов;

- температурные зависимости теплопроводности кварцевой керамики в диапазоне температур (300 – 1700) К и скоростей нагрева от 0 до 50 К/с.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: VI международной теплофизической школе «Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством» (Тамбов, 2007 г.), XVIII, XIX международных научно-технических конференциях «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» (Обнинск, 2007 г., 2010 г.), VII научной конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики» (Алушта, Крым, Украина, 2009 г.), VI, VII Международных конференциях «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий» (п. Кацивели, Крым, Украина, 2010 г., 2012 г.).

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, выводов и списка литературы. Объём диссертации составляет 154 страницы, в том числе 142 страницы текста. Работа включает 65 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 116 наименований.

Ценность научных работ Анучина Сергея Александровича заключается в том, что в них изложены результаты исследований теплопроводности, структуры, физических свойств и поведения в условиях эксплуатационных нагрузок кварцевой керамики, а также определены погрешности измерения температуры контактными датчиками и даны рекомендации по её уменьшению, что позволяет использовать данный подход для исследования материалов в ракетно-космической отрасли при создании высокотеплонагруженных узлов перспективных летательных аппаратов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена анализу современного состояния высокотемпературных теплофизических исследований. Описаны современные и перспективные керамические материалы для обтекателей головных частей ракет и требования, предъявляемые к этим материалам, а также особенности кварцевой керамики как высокотемпературного конструкционного материала.

Рассмотрены особенности методов теплофизических исследований керамических материалов. Анализируется прогресс в разработке нелинейных моделей тепловых процессов и алгоритмов решения обратных задач нестационарного теплообмена образцов. Методологии решения математически некорректных обратных задач получили развитие благодаря исследованиям академика А.Н. Тихонова, его учеников и последователей: В.Я. Арсеньева, В.Б. Глазко, А.М. Денисова и др. В приложении к задачам теплофизики методология решения обратных задач детально исследовалась в работах О.М. Алифанова, Е.А. Артюхина, А.В. Ненарокова (МАИ), Ю.М. Мацевитого (ИПМ им. А.П. Подгорного, Харьков), В.М. Юдина (ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского), С.В. Резника, П.В. Просунцова (МГТУ им. Н.Э. Баумана) и других авторов.

При постановке теплофизических экспериментов с образцами материалов целесообразно соблюдать ряд требований, повышающих точность обработки экспе-

риментальных данных с использованием математико-алгоритмического аппарата обратных задач теплопроводности (ОЗТ):

а) *Одномерность температурного поля в образце.* Обработка экспериментальных данных упрощается в случае формирования в экспериментальном образце одномерного температурного поля. Одномерность температурного поля в образце зависит от формы образца и соотношений его размеров (отношение длины/ширины/диаметра к толщине), равномерности нагрева и принудительного охлаждения образца, а также от интенсивности тепловых потерь с поверхности образца, не подвергаемых нагреву или принудительному охлаждению. Для обеспечения одномерности целесообразно поддерживать условия равномерного нагрева и охлаждения образца, минимизировать тепловые потери с его боковых поверхностей. На равномерность принудительного охлаждения образца и улучшение теплового контакта с холодильником благоприятно влияет тщательная обработка контактирующих поверхностей, применение теплопроводных паст и увеличение силы прижатия образца к холодильнику.

б) *Малые погрешности измерения температуры при ее достаточном уровне.* Наиболее распространенные в практике теплофизических исследований датчики температуры – термопары имеют высокую точность и стабильность характеристик, малую стоимость и удобны в работе. Известным недостатком термопар является отличие температуры чувствительного элемента (спая) термопары от истинной температуры материала. Это связано с различием теплофизических и оптических характеристик материалов образца и чувствительного элемента, оттоком или притоком теплоты по термоэлектродам, отсутствием надежного контакта чувствительного элемента с образцом или паразитными термическим сопротивлением в месте его монтажа. Для уменьшения погрешности измерения температуры необходимо использовать только аттестованные датчики, исключить их взаимное тепловое влияние при размещении образца, снизить контактное сопротивление в месте их установки, уменьшить неконтролируемую теплопередачу по термоэлектродам.

в) *Определенность условий теплообмена на границах экспериментального образца.* При радиационном нагреве на фронтальной поверхности образца граничное условие второго рода в задаче теплопроводности имеет форму теплового баланса между плотностью поглощенного теплового потока, теплового потока, переизлучаемого с поверхности в окружающую среду, и плотности потока, отводимого за счет конвекции. На точность задания плотности поглощенного теплового потока влияют плотность падающего теплового потока и поглощательная способность фронтальной поверхности. В свою очередь интенсивность переизлучаемого теплового потока зависит от излучательной способности и температуры фронтальной поверхности. Наконец, интенсивность конвективного теплообмена на фронтальной поверхности также зависит от температуры поверхности и от величины коэффициента теплообмена.

При задании граничного условия на тыльной поверхности образца должны быть приняты во внимание конкретные технические решения той или иной экспериментальной установки. Наиболее вероятны два варианта: тыльная поверхность образца теплоизолирована или она контактирует с проточным холодильником.

Для устранения неопределенности на тыльной поверхности образца должны быть обеспечены условия, близкие к идеальному тепловому контакту с холодильником. При воздействии на образец теплового потока высокой интенсивности скорость нагрева может достигать нескольких десятков градусов в секунду и вследствие больших градиентов температур в образце могут возникать термические напряжения, влияющие на качество теплового контакта между образцом и холодильником. Таким образом, скорость нагрева может влиять на величину теплового зазора между образцом и холодильником, вызывая неопределенность в граничных условиях.

Из сказанного видно, что при задании граничных условий второго рода на фронтальной поверхности и третьего рода на тыльной поверхности велико количество параметров теплообмена, установить точность которых затруднительно, и это неизбежно скажется на точности определения искомых величин при решении ОЗТ. Для снижения неопределенности в задании условий теплообмена на границах экспериментального образца целесообразно воспользоваться измерениями температур в нескольких точках образца, принимая показания датчиков в крайних точках за граничные условия первого рода.

Для учёта систематических погрешностей различных методов и их минимизации необходимо обеспечить измерение теплопроводности стандартных образцов из материала, характеристики которого хорошо изучены и не изменяются от времени, условий хранения и других технологических факторов. Одновременное использование стационарных и нестационарных методов исследования, основанных на решении линейной и нелинейной ОЗТ, позволяет более точно и достоверно определять теплопроводность керамических теплоизоляционных материалов в широком диапазоне температур (300 – 1700 К). Если теплопроводность, полученная по разным методам, сходится с определённым процентом отклонения, можно утверждать, что эти данные достоверны с таким процентом вероятности.

Для теплофизических исследований керамических материалов и минимизации их погрешности обосновывается применение контактных датчиков измерения температуры, которые должны обладать следующими свойствами: доступность, стабильность показаний, малая погрешность, высокая чувствительность, малые размеры, диапазон измеряемых температур до 1700 К. В связи с этим в качестве датчиков температуры выбраны термоэлектрические преобразователи температуры (термопары) из материала хромель-алюмель.

Отечественный и зарубежный опыт автоматизации установок для теплофизических исследований и направление их развития показал, что применение современных алгоритмов обработки экспериментальных данных и управление экспериментом невозможно без применения персональных компьютеров и встроенных устройств сбора и обработки измерительной информации.

Вторая глава посвящена способам повышения точности и производительности теплофизических исследований. Для построения комплекса теплофизических исследований рассматриваются новые программно-аппаратные средства автоматизации измерений отечественных и зарубежных производителей, обосновывается выбор архитектуры измерительной системы. С помощью измерительной системы MIC-400, серийно выпускаемой НПП «Мера», г. Мытищи, стало возмож-

ным реализовать более сложные алгоритмы теплофизических исследований. В частности, разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана программа решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности (ОЗТ) позволяет определять коэффициент теплопроводности λ и удельную теплоемкость c материалов до температур, ограниченных лишь средством нагрева и возможностями датчиков температуры. В основу программы положен численный алгоритм. Постановка задачи решения ОЗТ при нестационарном теплообмене образца изображена на Рис. 1.

Известны: $q_w, \varepsilon, \delta, \alpha_{f1}, \alpha_{f2}, T_{w2} = T_{f2} + q/\alpha_{f1}$

Измеряется: $T(x_i, \tau), i=1, N_s$ N_s – кол-во датчиков

Требуется определить: $\lambda(T); c(T)$

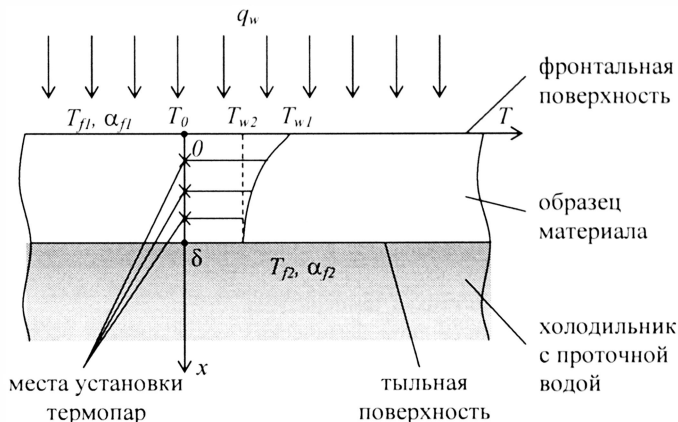


Рис. 1.

Постановка задачи решения ОЗТ при нестационарном теплообмене образца

Математическая модель процесса нестационарной теплопроводности в экспериментальном образце с соответствующими начальными и граничными условиями имеет вид:

$$c(T)\rho \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right); \quad (1)$$

$$\text{начальное условие:} \quad T(x, 0) = T_0(x); \quad (2)$$

$$\text{граничное условие 1-го рода:} \quad x = 0(\delta), T(x, \tau) = T_{w1(2)}(\tau); \quad (3)$$

граничное условие 2-го и 3-го рода:

$$x = 0, -\lambda(T) \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = A_{w1}(T)q_{w1}(\tau) - \varepsilon_{w1}(T)\sigma_0(T^4(0, \tau) - T_{f1}^4) - \alpha_{f1}(T)(T(0, \tau) - T_{f1}), \quad (4)$$

$$x = \delta, \lambda(T) \frac{\partial T(\delta, \tau)}{\partial x} = \alpha_{f2}(T)(T(\delta, \tau) - T_{f2}), \quad (5)$$

где: ρ – плотность материала, A и ϵ соответственно поглощательная и излучательная способности поверхности образца, q – плотность падающего потока излучения, σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, α – коэффициент теплоотдачи, δ – толщина образца, индексы: $w1(2)$ – отнесение к фронтальной (тыльной) поверхности образца, $l(2)$ – отнесение к газовой среде на фронтальной (тыльной) поверхности.

Алгоритм решения ОЗТ основывается на экстремальной постановке, которая предполагает поиск зависимостей $c(T)$, $\lambda(T)$, доставляющих минимум квадратичному функционалу невязки экспериментальных и расчетных температур в местах установки датчиков за все время эксперимента:

$$S(\bar{u}) = \int_0^{\tau^*} \sum_{n=1}^{N_i} (T(x_i, \tau) - T^e(x_i, \tau))^2 d\tau; \quad (6)$$

$$\bar{u} = \{c(T), \lambda(T)\}; \quad S(\bar{u}) = \min; \quad S(\bar{u}) \leq \Delta^2,$$

где: τ^* – продолжительность эксперимента, N_i – количество датчиков температуры, T^e – экспериментальные температуры, Δ – интегральная погрешность измерения температуры T^e в N_i точках образца.

При нестационарном теплообмене образца необходимо стремиться к выполнению следующих условий:

- одномерный характер прогрева в зоне измерений;
- высокие градиенты температуры в том направлении, в каком необходимо исследовать ТФС;
- малые погрешности датчиков температуры.

Для повышения точности теплофизических исследований рассматриваются методы измерения температуры в малоразмерных керамических образцах контактными датчиками.

Для выбора наиболее удовлетворяющей этим условиям формы образца проводился по результатам термомеханического анализа с помощью математического моделирования методом конечных элементов. Эксперименты проводились с образцами, представляющими собой сборку стержневых элементов размером $(7 \times 7 \times 70)$ мм³ по схеме Г.Н. Середы (Рис. 2).

К достоинствам данного варианта образца можно отнести то, что образующие его стержневые элементы применяются для определения механических свойств конструкционной керамики. Они изготавливаются из технологических припусков изделий, что гарантирует одинаковые свойства материала изделия и образцов. Экспериментальные исследования подтвердили правильность выбранной схемы. Данные по теплопроводности, полученные на указанных образцах согласуются со справочными данными с погрешностью, не превышающей 7%. С помощью математического моделирования напряженно-деформированного состояния «стержневой пластины» определена оптимальная скорость нагрева фронтальной поверхности – 5 К/с.

Для заделки термопары в образец применяется высокотемпературный термоцемент, приготовленный из жидкого стекла с добавлением порошка оксида алюминия. Такой термоцемент имеет малую стоимость и легко доступен, а его термостойкость достаточна для практического применения при теплофизических ис-

следованиях. Теплофизические свойства (ТФС) подобного термоцемента в литературе отсутствовали. В настоящей работе такие исследования были проведены методом квазистационарного теплового режима, а полученные данные использовались для определения величины методической погрешности термометрических измерений.

Результаты моделирования влияния ТФС термоцемента на погрешность измерения температуры дают основание полагать, что применение термоцемента значительно уменьшает погрешность измерения температуры и, как следствие, уменьшает погрешность определения теплопроводности до 5% для керамических материалов на основе SiO_2 .

В качестве эталонного материала для контроля точности определения теплопроводности в области температур до 1100 К рекомендовано стекло кварцевое оптическое марки КВ (О.А. Сергеев). Корректное сравнение данных образцового материала и исследуемого по эффективной теплопроводности возможно в области температур до 870 К, так как при более высоких температурах заметную роль начинает играть перенос теплового излучения в материале образца.

В третьей главе описана методика и приведены результаты исследований теплопроводности кварцевой керамики.

Применение новых средств автоматизации позволило создать комплекс определения ТФС керамических материалов, в котором реализована методика высокотемпературных исследований теплопроводности керамических материалов. Методика включает три метода определения теплопроводности: квазистационарный тепловой режим, импульсный тепловой поток и нестационарный тепловой режим. Так как эти три метода имеют разные темпы нагрева и процессы теплопереноса в образце и, следовательно, решения ОЗТ для определения теплопроводности материала, выбор метода определения ТФС зависит от назначения материала и условий его эксплуатации, а определение ТФС разными методами повышает достоверность полученных данных.

Метод нестационарного теплового режима основан на численном алгоритме решения нелинейной коэффициентной ОЗТ, который позволяет восстанавливать температурные зависимости удельной теплоемкости $c(T)$ и коэффициента теплопроводности $\lambda(T)$ по экспериментальным термограммам. При этом возможно как

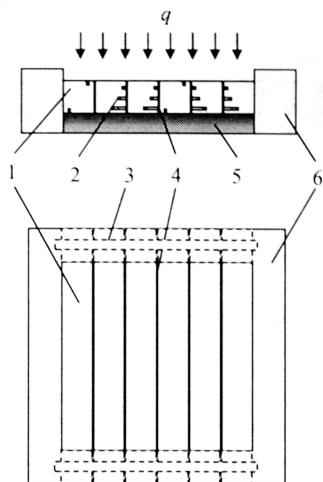


Рис. 2.

Образец в виде пластины из стержневых элементов:

1 – стержневой элемент; 2 – термометра в пазу; 3 – скоба; 4 – клеевой слой; 5 – холодильник; 6 – теплоизоляция

раздельное, так и комплексное определение указанных температурных зависимостей.

Рассматривается экспериментальный образец в виде плоского слоя изотропного материала, ТФС и оптические свойства которого зависят от температуры (Рис. 1). Считается, что образец находится в условиях одностороннего лучистого нагрева, обеспечивающих одномерный перенос тепла. Начальное распределение температуры и условия конвективного теплообмена на его границах известны, т.е. заданы температуры окружающей газовой среды и температурная зависимость коэффициента теплоотдачи. Оптические свойства границ образца также считаются известными.

В процессе эксперимента осуществляется измерение температуры в нескольких точках образца. По этим данным определяются температурные зависимости теплопроводности материала.

Расчетные значения температур в местах установки датчиков, используемые при вычислении функционала (6), определяются из численного решения системы (1) – (5) методом конечных разностей.

Искомые температурные зависимости $\lambda(T)$ и $c(T)$ представляются кусочно-линейными зависимостями:

$$\lambda(T) = \sum_{k=1}^{K_1} p_{1,k} \varphi_{1,k}; \quad c(T) = \sum_{k=1}^{K_2} p_{2,k} \varphi_{2,k};$$

где $p_{1,k}$, $p_{2,k}$ – искомые параметры; $\varphi_{1,k}$, $\varphi_{2,k}$ – базисные кусочно-линейные функции; K_1 , K_2 – число участков линейной аппроксимации зависимостей $\lambda(T)$ и $c(T)$ соответственно.

В ОАО «ОНПП «Технология» совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана была создана установка, оснащённая блоком галогенных ламп накаливания, позволяющая нагревать образцы керамических материалов размерами (70×70) мм² толщиной до 10 мм тепловым излучением до температуры 1700 К со скоростью до 50 К/с.

Для определения методической погрешности определения теплопроводности были проведены контрольные испытания материала, выбранного в качестве образцового – кварцевое стекло марки КВ. Анализ результатов показал сходимость стационарного и нестационарного методов в пределах 10 % в области температур до 700 К с данными государственного стандарта на кварцевое стекло. При более высоких температурах наблюдается расхождение данных, связанное с прозрачностью кварцевого стекла для теплового излучения.

Как уже упоминалось, при нагреве выше 1400 К кварцевая керамика кристаллизуется, однако интенсивность образования кристобалита зависит от времени выдержки при высокой температуре. Было сделано предположение, что при нестационарном нагреве в изделии вследствие кратковременности температурного воздействия кристобалит не успевает образоваться в больших количествах в отличие от стационарных условий исследований теплофизических свойств. Для проверки этого предположения исследовалось образование кристобалита в образцах кварцевой керамики при различных тепловых режимах. При нагреве в условиях близких к стационарному методу до 1700 К образец практически полностью закристаллизовался. При нагреве со скоростью 5 К/с на поверхности образца было

зафиксировано образование кристобалита. Однако послойное снятие материала образца показало, что кристобалит образуется в поверхностном слое толщиной не более 200 мкм, что по сравнению с толщиной используемого образца 7 мм не приводит к существенному влиянию на теплопроводность материала. Увеличение скорости нагрева до 40 К/с показало, что образование кристобалита в образцах ничтожно мало.

Исследование микроструктуры кварцевой керамики после нагрева до 1700 К со скоростью 40 К/с не выявило отличий в микроструктуре нагретого и исходного материала. Отсюда следует, что в тепловых условиях эксплуатации кварцевой керамики в высокотеплонагруженных элементов ЛА фазовый состав и структура материала остаются стабильными, по крайней мере, до температуры 1700 К. Из проведенного исследования можно сделать вывод, что для экспериментального определения теплопроводности кварцевой керамики методы стационарного теплового режима неприменимы вследствие интенсивных фазовых превращений материала с образованием кристобалита, которое приводит к резкому росту теплопроводности. При этом может быть применен метод нестационарного нагрева, при котором заметных фазовых превращений не наблюдается, что соответствует состоянию материала в изделии.

Для выявления вклада радиационной составляющей теплопереноса сравнивались различные методы определения теплопроводности. До 800 К полученные значения совпадают с фоновой составляющей теплопроводности с точностью до 5 % для стационарного и нестационарного методов, а в интервале температур 800 – 1200 К с точностью до 15 %. Известно, что фоновая составляющая теплопроводности керамики не зависит от теплового режима нагрева, а является характеристикой фазового состава и структуры материала и определяется формулой: $\lambda_{\text{фон}} = c\rho l/3$, где c – удельная теплоёмкость; ρ – плотность; l – скорость звука; l – средний свободный пробег фононов, в то время как радиационная составляющая теплопроводности может зависеть от скорости нагрева, размеров образца и оптических свойств граничных поверхностей. В связи с этим расхождение полученных данных выше 800 К, когда материал становится прозрачным для теплового излучения, по-видимому, обусловлен различным вкладом радиационной составляющей в процесс теплопереноса при стационарных и нестационарных тепловых условиях исследований частично прозрачных материалов. Для проверки этого положения было произведено математическое моделирование одностороннего нагрева с целью оценки вклада радиационной составляющей теплопереноса в теплопроводность кварцевой керамики.

Наибольший вклад радиационной составляющей в теплоперенос имеет место при прозрачности или частичной прозрачности материала в спектральной области максимума тепловой энергии (ближний и средний ИК-диапазоны). В этом случае тепловая энергия, переносимая излучением, распространяется в материале на значительную глубину и более эффективно происходит его нагрев. Вследствие этого тепловые расчеты в частично прозрачных материалах необходимо производить с использованием моделей радиационно-кондуктивного теплопереноса.

Перенос тепла излучением моделировался с использованием двухпоточкового приближения, при котором излучение в материале представлялось двумя потока-

ми, идущими навстречу друг другу (E_1 и E_2). Радиационно-кондуктивный теплоперенос в двухпотокном приближении описывался системой уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{dE_1(\gamma)}{dx} &= 2k(\gamma, T) (P(\gamma, T) - E_1(\gamma)) + \frac{2k(\gamma, T)\Lambda(\gamma, T)\varphi}{1 - \Lambda(\gamma, T)} (E_2(\gamma) - E_1(\gamma)), \\ \frac{dE_2(\gamma)}{dx} &= -2k(\gamma, T) (P(\gamma, T) - E_2(\gamma)) - \frac{2k(\gamma, T)\Lambda(\gamma, T)\varphi}{1 - \Lambda(\gamma, T)} (E_1(\gamma) - E_2(\gamma)),\end{aligned}\quad (7)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{c\rho} \int k(\gamma, T) (E_1(\gamma) + E_2(\gamma) - 2P(\gamma, T)) d\gamma + \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2},$$

где γ – длина волны, $E_1(\gamma)$ и $E_2(\gamma)$ – соответственно плотности потоков излучения, совпадающего с направлением падающего излучения и противоположного ему, $P(\gamma, T)$ – функция Планка, $k(\gamma, T)$ – показатель поглощения, $\Lambda(\gamma, T)$ – альбеда рассеивающей среды, определяемое как $s(\gamma, T)/(k(\gamma, T) + s(\gamma, T))$, где $s(\gamma, T)$ – показатель рассеяния, φ – доля излучения, рассеянного назад, определяемая как $(3 - x_1)/8$, x_1 – первый член в разложении индикатрисы рассеяния по полиномам Лежандра, τ – время.

Система уравнений (7) путем конечно-разностной аппроксимации производных по пространству сводилась к системе алгебраических и дифференциальных уравнений по времени для радиационных потоков и температуры в каждой точке пространственной расчетной сетки. Последняя система решалась с использованием средств программного пакета для математического моделирования Matlab.

При моделировании радиационно-кондуктивного теплопереноса была использована температурная зависимость фоновой составляющей коэффициента теплопроводности, полученная с помощью метода лазерной вспышки. Результаты численного моделирования метода нестационарного нагрева закладывались в программу решения обратной задачи. Рассчитанная таким образом теплопроводность совпадает с экспериментальными данными, за исключением методической погрешности, которая, видимо, связана с расположением в образце датчиков температуры, имеющим теплопроводность много большую, чем кварцевая керамика. Известно, что значения, получаемые по формуле Росселанда:

$$\lambda_{эф} = \lambda_{фон} + \frac{4\pi}{3} \int \frac{n_\gamma^2}{k_\gamma + s_\gamma(1 - \bar{\mu}_\gamma)} \frac{\partial I_{P_\gamma}}{\partial T}(T) d\gamma, \quad (8)$$

где n_γ – показатель преломления, $\bar{\mu}_\gamma$ – средний косинус угла рассеяния, I_{P_γ} – спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела, характерны для слоев материала большой толщины при медленном нагреве с низким градиентом температуры, что близко к тепловым условиям квазистационарного метода. Для стационарного теплового режима получено удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных в рамках методической погрешности (Рис. 3). Согласно расчету вклад радиационной составляющей в эффективную теплопроводность увеличивается с увеличением температуры по степенному закону и при 1700 К составляет около 80%.

Исследовалась зависимость теплопроводности кварцевой керамики от скорости нагрева. С помощью модели радиационно-кондуктивного теплопереноса рас-

считывалось температурное поле в образце, и решалась ОЗТ при различных скоростях нагрева (рис. 4).

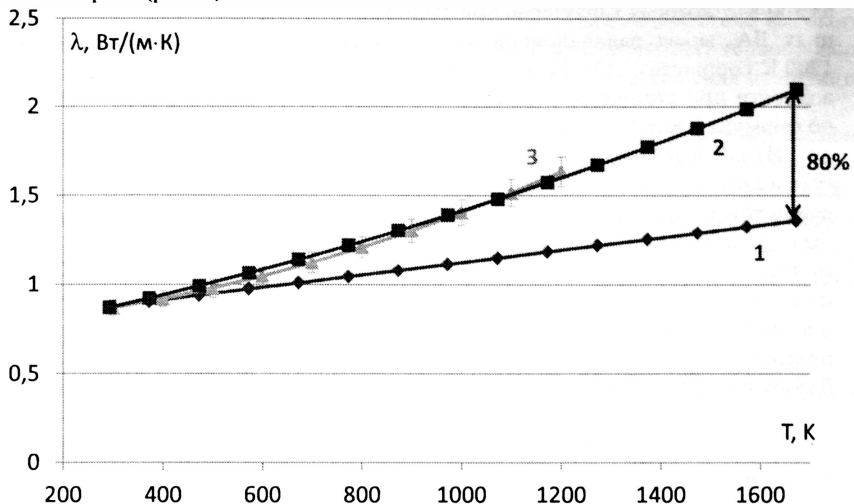


Рис. 3.

Теплопроводность кварцевой керамики: 1 – фоновая теплопроводность; 2 – расчёт по формуле Росселанда; 3 – эксперимент, квазистационарный тепловой режим

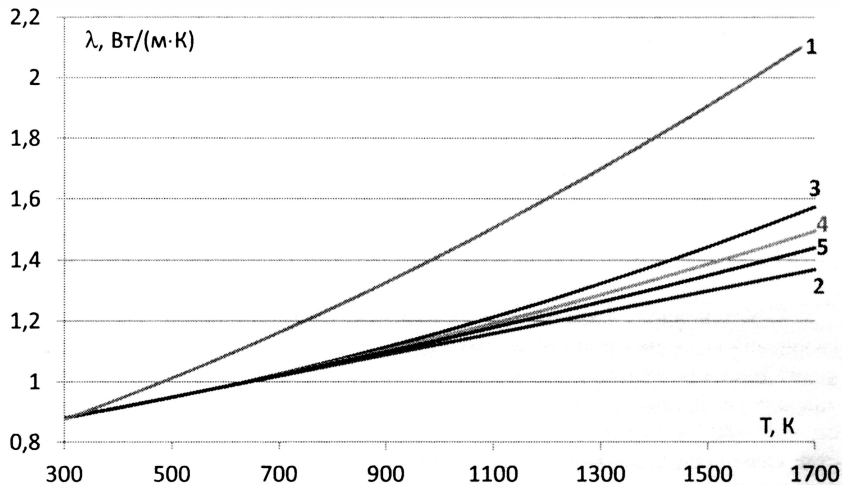


Рис. 4.

Теплопроводность кварцевой керамики: 1 – определённая для стационарного режима по формуле Росселанда; 2 – фоновая составляющая теплопроводности; 3 – 5 рассчитанные при скоростях нагрева 5 К/с, 30 К/с и 100 К/с соответственно

Моделирование показало, что с увеличением скорости нагрева вклад радиационной составляющей теплопроводности уменьшается. Так при скорости нагрева 100 К/с, которая характерна при эксплуатации кварцевой керамики в конструкциях ЛА, вклад радиационной составляющей в суммарный теплоперенос при 1700 К составляет ~5%. Наиболее велика радиационная составляющая теплопроводности при стационарном режиме теплообмена образцов (она рассчитывалась по формуле Росселанда (8)).

Из проведенного анализа следует, что значения теплопроводности, получаемые в квазистационарных тепловых условиях существенно превышают значения, полученные при высоких темпах нестационарного нагрева материала, характерных для эксплуатации материала конструкциях ЛА. Следовательно для экспериментального определения теплопроводности кварцевой керамики до 1700 К данные, полученные методом квазистационарного теплового режима неприменимы при проектировании конструкций высокоскоростных ЛА. При этом может быть применен метод нестационарного нагрева, при котором режим нагрева наиболее близок к эксплуатационному.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ:

1. Разработана методика изучения физической природы теплопереноса в образцах керамических материалов при интенсивных тепловых воздействиях и создано программное обеспечение для автоматизированного комплекса теплофизических исследований, что позволило:

- поднять верхнюю границу температурного диапазона до уровня 1700 К (на 500 К выше по сравнению с полученными ранее данными);
- исследовать коэффициент теплопроводности материалов при тепловых условиях близких к эксплуатационным, что существенно повышает достоверность получаемых результатов с погрешностью не выше 5%;
- сократить продолжительность теплофизических исследований в 3 – 5 раз.

2. Повышена точность измерения температуры контактными датчиками в образцах керамических материалов в интервале скоростей нагрева до 50 К/с за счет выбора рациональной схемы установки датчиков, изучения теплофизических свойств термощемента и расчётно-теоретического определения методической погрешности.

3. Установлена закономерность изменения коэффициента теплопроводности кварцевой керамики при различных тепловых режимах. Выявлен вклад в коэффициент теплопроводности радиационной составляющей теплопереноса при стационарном и нестационарном тепловом режимах, который составляют соответственно ~80% и не более 15% при 1700 К. Показано, что структура и фазовый состав кварцевой керамики при высокоинтенсивном нагреве материала до 1700 К, который близок к тепловому режиму эксплуатации материала в изделии, остаются стабильными.

4. Установлено, что для экспериментального определения коэффициента теплопроводности кварцевой керамики до 1700 К для использования при проектировании высокотеплонагруженных элементов конструкций перспективных ЛА

методы стационарного теплового режима неприменимы вследствие интенсивных фазовых превращений материала с образованием кристобалита, которые приводят к резкому росту коэффициента теплопроводности, а также вследствие высокого вклада радиационной составляющей теплопереноса в коэффициент теплопроводности кварцевой керамики, что приводит к погрешности определения коэффициента теплопроводности до 80% при температурах до 1700 К.

5. Для использования при проектировании высокотеплонагруженных элементов конструкций перспективных ЛА может быть применен метод нестационарного высокоинтенсивного нагрева при котором заметных фазовых превращений в кварцевой керамике не наблюдается, что соответствует состоянию материала в изделии, а вклад радиационной составляющей теплопереноса в коэффициент теплопроводности кварцевой керамики наиболее близок к ее вкладу при эксплуатационных тепловых воздействиях.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, из которых 4 в рецензируемых журналах и изданиях перечня, рекомендованного ВАК РФ, и 1 патент РФ на изобретение.

Основное содержание диссертационной работы в полной мере отражено в следующих работах:

1. К учёту методической погрешности измерения температуры контактными датчиками при теплофизических исследованиях / С.В. Резник, С.А. Анучин, П.В. Просунцов, А.В. Шуляковский // Новые огнеупоры. 2009. №3. С. 29 – 33 (0,3 п.л./0,15 п.л.).

2. Анучин С.А., Степанов П.А. Методика исследований теплофизических свойств керамических материалов при высоких температурах // Новые огнеупоры. 2009. №5. С. 41 – 43 (0,2 п.л./0,1 п.л.).

3. Анучин С.А., Степанов П.А., Середа Г.Н. Методика высокотемпературных исследований теплофизических свойств керамических материалов аэрокосмического назначения // Огнеупоры и техническая керамика. 2010. №4. С. 41 – 44 (0,2 п.л./0,1 п.л.).

4. Высокоэффективные поглощающие покрытия для теплофизических исследований на установках радиационного нагрева / С.В. Резник, М.О. Забежайлов, С.А. Анучин, М.О. Сотников, К.В. Афонин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2012. Спецвыпуск № 3. С.120 – 131 (0,8 п.л./0,3 п.л.).

5. Способ определения коэффициента теплопроводности частично прозрачных материалов: Патент на изобретение №2501002 / М.Ю. Русин, С.В. Резник, В.С. Райлян, М.О. Забежайлов, С.А. Анучин заявл. 03.07.2012; опубл. 10.12.2013 Бюл. №34 (0,12 п.л./0,06 п.л.).

6. Анучин С.А., Степанов П.А., Середа Г.Н. Методика высокотемпературных исследований теплофизических свойств керамических материалов аэрокосмического назначения // Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством: Материалы VI международной теплофизической школы. Тамбов, 2007. Ч. 1. С. 89 – 91 (0,2 п.л./0,1 п.л.).

7. Анучин С.А. Методики и средства автоматизированных исследований теплофизических свойств керамических материалов аэрокосмического назначения // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: Тезисы докладов XVIII международной научно-технической конференции. Обнинск, 2007. С. 77 – 79 (0,2 п.л./0,2 п.л.).

8. Анучин С.А., Бородай С.П., Забейжайлов М.О. Расчет радиационно-кондуктивного теплопереноса в частично прозрачном рассеивающем материале на основе кварцевого стекла // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: Сборник научных статей по материалам 7-й научной конференции. Алушта, 2009. Ч. 1. С. 79 – 80 (0,12 п.л./0,06 п.л.).

9. Анучин С.А., Забейжайлов М.О., Серeda Г.Н. Сравнительный анализ различных методов определения коэффициента теплопроводности в частично прозрачном материале на основе кварцевого стекла // Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий: Тезисы докладов VI международной конференции. Киев, 2010. С. 197 (0,06 п.л./0,04 п.л.).

10. Анучин С.А., Забейжайлов М.О. Анализ влияния радиационного теплопереноса на точность определения коэффициента теплопроводности частично прозрачных материалов // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: Тезисы докладов XIX международной научно-технической конференции. Обнинск, 2010. С.119 – 121 (0,2 п.л./0,1 п.л.).

11. Особенности температурной зависимости коэффициента теплопроводности кварцевой керамики при экстремальных тепловых режимах / М.О. Забейжайлов, М.Н. Кордо, С.А. Анучин, Г.Н. Серeda // Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий: Тезисы докладов XII международной конференции. Киев, 2012. С. 160 (0,06 п.л./0,04 п.л.).