

На правах рукописи

Середа Геннадий Николаевич



ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТЕПЛООБМЕНА В КЕРАМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛАХ

Специальность 01.04. 14 –Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Обнинск – 2015

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
Резник Сергей Васильевич

Официальные оппоненты: Петров Вадим Александрович—доктор  
технических наук, профессор, МГТУ—  
МИРЭА, профессор  
Зуев Андрей Владимирович – кандидат  
технических наук, ФГУП ГИЦ «ВИАМ»,  
заведующий лабораторией

Ведущая организация ОАО «Композит»,  
г.Королёв, Московская обл.

Защита состоится 18 мая 2015 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ), по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета) <http://www.mai.ru/events/defence/>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д212.125.08

д.т.н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

### **Общая характеристика работы**

**Актуальность.** В современных изделиях различного назначения, в том числе ракетного и авиационного, широко применяют керамические материалы. Применительно к антенным обтекателям керамические элементы обеспечивают оборудованию необходимые тепловую, прочностную защиту и работоспособность в требуемом радиодиапазоне. Увеличение скорости полета ракет в атмосфере приводит к возрастанию нагрузок на обтекатель, повышению температуры его поверхности до 1500-2000К, интенсификации теплообмена в нём и снижению его теплозащитных и прочностных показателей. Для обеспечения безопасной эксплуатации бортового оборудования в этих условиях материаловеды вынуждены заниматься разработкой новых керамических материалов, а конструкторы - учитывать температурные зависимости характеристик конструкционных материалов в новом диапазоне эксплуатационных температур. Прогнозирование теплообмена в конструктивных элементах невозможно без знания их теплофизических характеристик (ТФХ). Вместе с тем, справочные данные по ТФХ керамических материалов известны, как правило, до 1100 К, а данные по ТФХ ряда перспективных материалов, например стеклокерамики и нитридной керамики, отсутствуют.

Определение ТФХ, являющихся параметрами контроля продукции, должно обладать достаточно высокой производительностью и точностью

Одна из важнейших характеристик в оценке теплового режима конструкции - коэффициент теплопроводности материала, рассчитываемый по результатам косвенных измерений. В теоретическом плане его определение опирается на аппарат обратных задач математической физики.

Традиционные методы определения этой характеристики и их математико-алгоритмическое обеспечение основаны на стационарных или регулярных режимах одномерного теплопереноса в единичном образце исследуемого материала, а экспериментальные установки имеют достаточно сложные конструкции особенно, когда это касается исследований при

высоких температурах. Продолжительность испытаний образца достигает десятков часов, что может привести к изменению структуры керамики и ТФХ. Измерения высоких температур заставляют применять дорогие платиносодержащие термодпары. Экспериментальные образцы нужных размеров необходимо изготавливать из образцов-свидетелей, характеристики которых могут отличаться от характеристик материала изделия. Всё выше перечисленное делает традиционные методы определения коэффициента теплопроводности керамики при высоких температурах излишне трудоемкими и недостаточно информативными.

В последнее время получили развитие методы определения ТФХ при нестационарном теплообмене в экспериментальном образце, основанные на решении нелинейных коэффициентных обратных задач теплопроводности (КОЗТ). Они имеют существенные преимущества по сравнению с традиционными методами, но применение соответствующих вычислительных программ вызывают затруднения у пользователей в связи с недостаточным вниманием разработчиков к прикладной стороне этих методов. Эффективным инструментом в реализации преимуществ новых методов являются математические методы оптимизации теплофизического эксперимента. Его моделирование пока недостаточно проработано в выборе режимов испытаний, формы и размеров образцов, характеристик испытательного оборудования и планировании измерений, недостаточен уровень метрологического обеспечения. Отдельные виды моделирования применяются разобщённо, а не как взаимосвязанные части единой методологии.

Актуально решение проблемы реализации новых методов и средств определения теплофизических свойств материалов керамических обтекателей, одновременно обладающих высокой производительностью и точностью, соответствующих возможностям современной техники.

Вопросы, рассмотренные в диссертации, были включены в тематические планы НИР, проведенных в ОНПП «Технология» в 2000 – 2013 гг.

совместно с МГТУ им. Н.Э.Баумана при поддержке Росавиакосмоса и Минобразования РФ, что нашло отражение в научно-технических отчетах по этим темам.

**Личный вклад автора** состоит в формулировке основных подходов в постановке экспериментальных исследований ТФХ, разработке методов моделирования, анализе и обобщении полученных результатов, схемных решений по автоматизированному стенду теплофизических исследований. Все основные результаты и выводы получены лично автором.

**Апробация результатов работы.** Основные положения и выводы диссертационной работы докладывались автором на международных и Всероссийских научных конференциях.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 13 научных работ в виде статей в научно-технических журналах, 3 из списка ВАК, и тезисов докладов в сборниках конференций за период 2004 - 2014 гг.

**Объектом исследования** являются коэффициент теплопроводности, характеристика теплообменного процесса в материале, определяемая в условиях одностороннего нагрева образца, и соответствующее экспериментальное оборудование.

**Предмет исследования** – керамические материалы на основе диоксида кремния и нитрида кремния.

**Цель работы:** Определение коэффициентов теплопроводности конструкционной керамики в области температур 300-1673 К и темпов нагрева до 5 град/с на основе комплексного - математического и физического моделирования тепловых процессов в экспериментальных образцах материалов и измерительных узлах стенда теплофизических исследований с установкой радиационного нагрева.

Задачи исследования:

Оптимизация эксперимента на основе моделирования теплообмена в керамических материалах при одностороннем радиационном нагреве образцов до температуры 1673 К.

Разработка физических и математических моделей прогнозирования теплообмена для выбора режимов нагрева, формы и размеров образцов, параметров экспериментальной установки, оценки погрешностей эксперимента.

Разработка автоматизированного стенда теплофизических исследований керамических материалов с установкой радиационного нагрева образцов в области измерения температуры 300-1673 К и темпов нагрева до 50 град/с.

Разработка методики определения эффективного коэффициента теплопроводности, получение новых расчетно-экспериментальных данных о теплопроводности исследуемых материалов, оценка погрешностей их определения и анализ закономерностей теплообмена в керамических материалах по результатам проведенных экспериментов.

**Научный базис для решения проблемы.** Выбор и разработка методов достижения поставленной цели осуществлены автором с учетом основных достижений в области теплофизических исследований ОИВТ РАН, ВИАМ, ИТМО им. А.В. Лыкова, ИТФ СО РАН им. С.С. Кутателадзе, МАИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГУ им. М.В. Ломоносова, МЭИ, ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского и других организаций.

**Методы исследований.** Представленная работа основывается на использовании и развитии методов оптимизации теплофизического эксперимента.

**Научная новизна** представленной работы.

1. Впервые при исследовании теплопроводности керамических материалов научно обоснован подход к оптимизации теплофизического эксперимента с применением критерия оценки минимизации затрат.

2. Разработана математическая модель сопряжённого радиационно-кондуктивного теплообмена в элементах конструкции стенда радиационного нагрева, позволившая выбрать форму и размеры образцов исследуемых материалов, режимы их испытаний, а также оптимизировать мощность электрических нагревателей.

3. Предложена методика расчёта погрешности определения теплопроводности материала с использованием теории статистико-вероятностных критериев оценки.

4. Разработана методика определения коэффициентов теплопроводности новой термостойкой керамики на основе диоксида кремния и нитрида кремния при температурах до 1673 К. Получены расчетно-экспериментальные данные с методической погрешностью, не превышающей 7%.

**Практическая значимость** работы выражается в следующих результатах:

1. Создан автоматизированный стенд высокопроизводительных теплофизических исследований керамических материалов с односторонним радиационным нагревом образцов в диапазоне изменения температур 300-1673 К и темпов нагрева до 50 град/с, удовлетворяющий условиям экспериментов с сохранением паспортной (исходной) структуры и свойств исследуемых материалов.

2. Получены расчетно-экспериментальные данные по теплопроводности новой перспективной керамики на основе диоксида кремния и нитрида кремния марок НИАСИТ-8ПП, ОТМ-357, ОТМ-904 в диапазоне измерения температур 300-1673 К и темпа нагрева 5 град/с, которые нашли применение в теплопрочностных расчётах элементов конструкций авиационной и ракетно-космической техники.

3. Разработанные и апробированные математические модели, методы и средства исследований используются для определения коэффициентов теплопроводности керамических материалов антенных обтекателей, создаваемых в ОАО «ОНПП Технология».

4. Проведенные в данной работе исследования и разработанное на их основе оборудование методы и средства позволили повысить температуру определения коэффициента теплопроводности перспективных керамических материалов с 1100 до 1673 К и более чем на два прядка

величины сократили время проведения эксперимента, в двадцать пять раз уменьшили расход электроэнергии, потребляемой в эксперименте.

**Внедрение.** Разработанные программы, методика, испытательное оборудование и результаты математического, физического моделирования используются для определения коэффициентов теплопроводности опытных керамических материалов для антенных обтекателей в ОАО «ОНПП Технология».

**Достоверность результатов** проведенных на моделях и образцах керамических материалов, подтверждается:

- высоким уровнем метрологического обеспечения на стенде с использованием автоматизированных систем с современным математическим программным обеспечением;

- сопоставлением для одних и тех же материалов результатов специальных тестовых численных и физических экспериментов данной работы с экспериментальными данными, полученных традиционными методами.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методология организации теплофизического эксперимента при определении коэффициентов теплопроводности керамических материалов.
2. Алгоритмы и программные продукты решения прямых тепловых и теплопрочностных задач, обеспечивающие моделирование и оптимизацию режима испытаний, с учетом технических возможностей испытательного оборудования и предполагаемых свойств, размеров и формы образцов исследуемого материала.
3. Результаты оценки области корректного применения решений одномерной коэффициентной обратной задачи теплопроводности по режимам нагрева, тепловым потокам и габаритным размерам применяемых образцов из оксидной и нитридной керамик.
4. Модели и алгоритмы определения погрешностей контактных датчиков и планирования измерений, обеспечивающие достижение высокой точности идентификации параметров теплопереноса целенаправленным выбором



количества и мест установки датчиков и коррекцией экспериментальных термограмм.

5. Технические решения по конструкции экспериментального оборудования, системам управления режимами испытаний, измерения, сбора и подготовки данных эксперимента для определения теплопроводности образцов натуральных конструкций при температурах до 1673К, темпах нагрева до 50 К/с.

6. Форма образцов для проведения теплофизических экспериментов, позволяющая использовать материал припусков изделий.

7. Методика определения коэффициента теплопроводности керамических материалов в области 300 – 1500К и темпом одностороннего нагрева 5 К/с.

8. Данные о теплопроводности стеклокерамики, нитрид кремниевой керамики и кварцевой керамики при температурах до 1423, 1573, 1673К соответственно.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация имеет общий объём 131 страница и состоит из введения, 4-х глав и заключения, в том числе содержит 55 рисунков, 4 таблицы, а также библиографию из 85 наименований на 7 страницах.

### **Краткое содержание диссертации**

Во введении обоснована актуальность разработки новых методов определения ТФС керамических материалов при температурах выше 1300 К на основе решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности, применения новых способов нагрева образцов (односторонний радиационный) и новых измерительно-информационных и управляющих систем в теплофизическом эксперименте. Сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые автором на защиту.

**Первая глава** носит обзорно-аналитический характер, раскрывает современное состояние материаловедческих исследований конструкционной керамики для антенных обтекателей (АО), методов

определения ТФХ керамических материалов, испытательного оборудования, средств измерения параметров объекта исследований и управления тепловыми режимами испытаний.

В данной главе на основе обзора литературы более подробно рассмотрены методы решения обратных задач для определения ТФХ материалов с низкой теплопроводностью. Отмечено, что их использование для работы в области температур выше 900 К в последние годы стало более массовым, но в серийном производстве осталось незначительным.

В связи со спецификой контроля ТФХ материала АО каждого изделия признана целесообразной к применению программа ICP-3, предназначенная для определения коэффициента теплопроводности материала.

Первая глава завершается формулировкой цели и задач настоящей работы.

**Вторая глава** посвящена решению вопросов методологии подготовки и проведения теплофизического эксперимента, условий применения программы ICP-3, проектирования нагревательной установки при использовании ламп инфракрасного нагрева, выбору формы и размеров образца исследуемого материала, оценке и минимизации погрешностей эксперимента.

В рамках задач оптимального планирования организация теплофизического эксперимента заключалась в формировании структуры (иерархии) приоритетов и пошаговом выполнении их на **условиях минимизации затрат**. Структура имеет следующий вид: «**исходные условия – модели эксперимента – образец – технические и методические средства реализации эксперимента – результат**».

Применительно к данной работе **исходными условиями** являются:

температурная область исследования параметров: 300 - 1673 К;

способ нагрева образца материала – нестационарный, односторонний, радиационный, сокращающий продолжительность испытаний до

нескольких минут и исключая возможное изменение структуры исследуемого материала в процессе нагрева;

средство расчёта ТФХ материала – программа решения одномерной нестационарной КОЗТ ИСР-3 с применением экспериментальных показаний трёх первичных преобразователей одного типа, установленных в образце;

форма образца материала – сплошная или составная пластина (диск) толщиной 5-10 мм с отношением толщины к большему линейному размеру равным 1/8 для создания условий одномерного теплопереноса – унифицированная по размерам с образцами для других видов испытаний;

способ оценки результатов эксперимента – статистико-вероятностный.

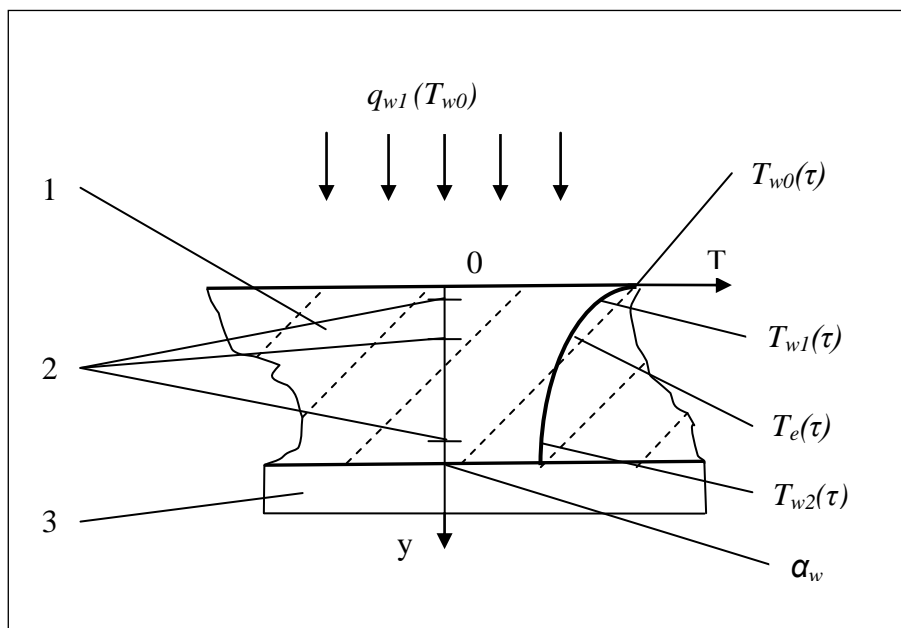
В основу эксперимента положен способ одностороннего нагрева образца материала по регулярному режиму 2-го рода посредством управляющей термопары  $T_{wo}(\tau)$ , закреплённой на его фронтальной поверхности, и измерений в процессе испытаний температур в нескольких точках образца (не менее трёх), разно удалённых от поверхности нагрева.

Определение коэффициентов теплопроводности материала выполняют решением одномерной нестационарной КОЗТ ИСР-3, построенной на условиях минимизации функционала невязки  $S(u)$  экспериментальных  $T^e(y_n, \tau)$  и расчётных  $T(y_n, \tau)$  температур в местах установки датчиков  $y_n$  в течение всего эксперимента в экстремальной постановке.

$$\min S(u) = \int_0^{\tau_u} \sum_{n=1}^{N_i} (T(y_n, \tau) - T^e(y_n, \tau))^2 d\tau < \varepsilon_M^2;$$

где  $\varepsilon_M$  – устанавливаемая абсолютная погрешность определения теплопроводности, обусловленная неточностью задания параметров, используемых в решении ОЗТ.

Принципиальная схема теплофизического эксперимента представлена на рисунке 1.



1 – образец исследуемого материала; 2 – термопары; 3 – холодильник

Рисунок 1– Схема эксперимента по определению ТФХ керамических материалов

Показателем уровня оптимизации эксперимента является приведённая погрешность определения коэффициента теплопроводности  $\varepsilon_\lambda$ . Её можно представить в виде методической  $\varepsilon_m$  и случайной  $\varepsilon_{сл}$  составляющих, которые связаны между собой формулой вида:

$$\varepsilon_\lambda = (\varepsilon_m^2 + \varepsilon_{сл}^2)^{1/2}$$

Случайная погрешность связана как с качеством подготовки образца к эксперименту, так и с разбросом определяемых характеристик в материале образца.

Методическая составляющая погрешности эксперимента обусловлена точностью расчёта коэффициентов теплопроводности самой программой ИСР-3, размерами и формой образца и граничными условиями на его поверхностях, возможным искажением температурного поля в образце от установленных в нём термопар. Она может быть предварительно оценена и минимизирована методами математического моделирования.

Это – математические модели теплообмена, построенные на решении нелинейных задач нестационарной теплопроводности в образцах в виде пластины с априори известными ТФХ. Полученные в процессе моделирования эксперимента температуры образца в заданных точках вводят в исходный файл программы решения КОЗТ и на выходе получают значения коэффициента теплопроводности в исследуемом диапазоне температур, которые затем сравнивают с заданными значениями прямой задачи.

Методическую погрешность эксперимента определяют по формулам:

$$\lambda_{cp} = \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_{ij}}{n}, \quad \varepsilon_m = t_\alpha \times \left( \frac{\sum_{j=1}^n (\lambda_j - \lambda_{ij})^2}{n \times (n-1)} \right)^{0.5} / \lambda_{cp},$$

где  $n$  – объём выборки;  $\lambda_{cp}$  – среднее выборочное табличное значение  $\lambda$ ;  $\lambda_{ij}$ ,  $\lambda_j$  – табличное и рассчитанное значения  $\lambda$  из выборки, относящейся к  $T_i$ ;  $t_\alpha$  – значение коэффициента Стьюдента для заданного объёма выборки и доверительной вероятности  $\alpha$ .

Перечень моделей для оптимизации условий применения программы ИСР-3 и конечные цели решаемых ими задач в порядке применения приведены ниже.

Математическая модель одномерного теплообмена в неограниченной пластине для выбора уровня необходимых тепловых потоков, режима нагрева, толщины и формы образца.

Математическая модель трёхмерного сопряжённого радиационно–кондуктивного теплообмена в системе «внешний источник тепла – конструктивные элементы» для проектного расчёта нагревательной установки и выбора формы образца – пластины исследуемого материала.

Двухмерная модель кондуктивного нестационарного теплообмена в образце – пластине конечных размеров – для оценки погрешностей влияния термопар на его температурное состояние в процессе испытаний. Граничные условия для фронтальной поверхности образца задавали темпом

нагрева этой поверхности  $Vt$ ; для тыльной поверхности – приведённым к  $20^{\circ}\text{C}$  коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_b$  постоянными в процессе расчёта.

С учётом симметричности образца относительно его центральных осей и расположения начала системы координат в центре симметрии на фронтальной поверхности внутренние боковые поверхности его считали теплоизолированными,

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0,$$

а на внешних боковых поверхностях задавали постоянные в процессе расчёта коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_x, \alpha_z$ .

Результаты оптимизации эксперимента в порядке усложнения условий моделирования приведены на рисунках 2 – 6.

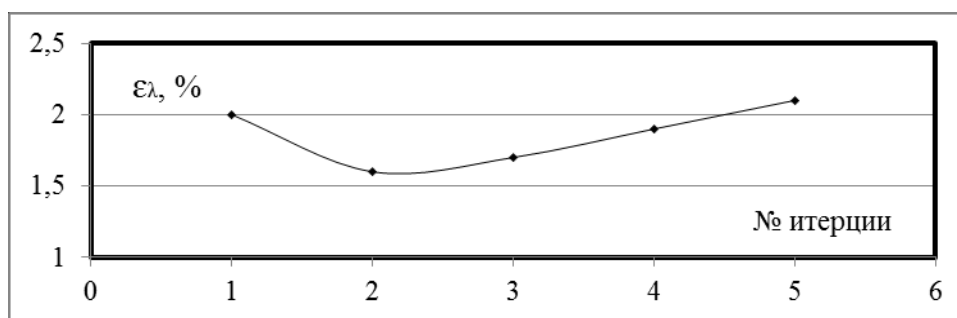


Рисунок 2–Зависимость методической погрешности от номера расчетной итерации программы ICP-3

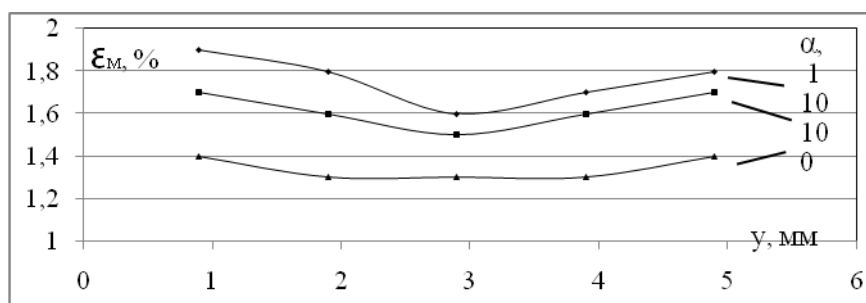


Рисунок 3 – Зависимость методической погрешности  $\epsilon_m$  от глубины расположения промежуточного датчика температуры в образце  $y$  для различных значений коэффициента теплоотдачи тыльной поверхности  $\alpha$

Из приведённой на рисунке 2 зависимости можно сделать вывод, что в пределах 2– 5 итераций методическая погрешность не превышает 2 % и в последующих расчётах наиболее достоверные результаты определения теплопроводности соответствуют этой области итерационного процесса.

Приведённые на рисунке 4 результаты показывают, что эта составляющая погрешности изменяется в пределах 2,2 – 1,3 % при задаваемых коэффициентах теплоотдачи тыльной поверхности образца от 0,1 до 100 Вт/(м<sup>2</sup>·град) и изменениях толщины образца от 3 до 10 мм. Такой результат позволяет ограничить дальнейшие исследования образцами толщиной 7 мм, которая соответствует массовому типоразмеру образцов, применяемых и для других испытаний.

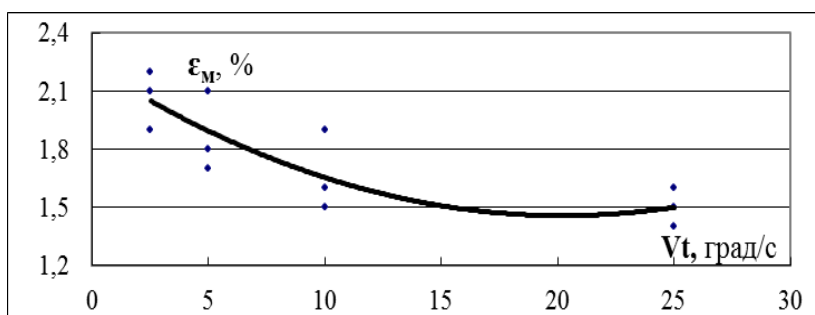
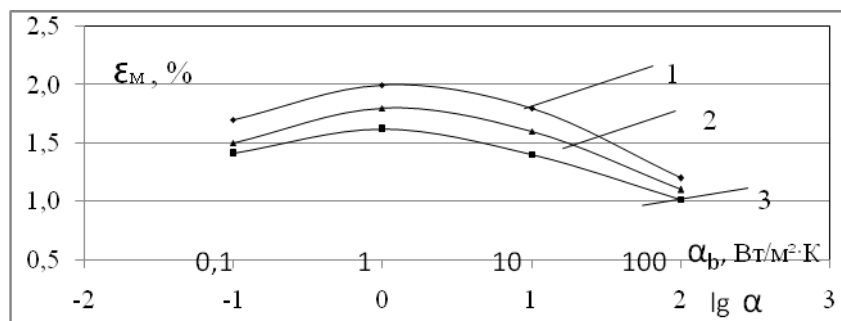


Рисунок 4– Зависимость  $\epsilon_m$ , средней по коэффициенту  $\alpha$ , от темпа нагрева фронтальной поверхности образцов толщин: 3; 7; 10 мм

Оценки влияния коэффициента теплоотдачи  $\alpha_b$  тыльной поверхности образцов исследуемых материалов толщиной 7 мм на  $\epsilon_m$  для  $Vt = 5$  К/с приведены на рисунке 5.

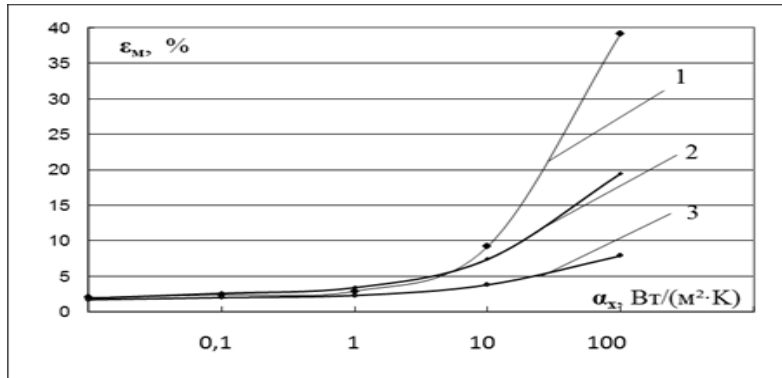


1–кварцевая керамика; 2– нитрид кремния; 3– стеклокерамика

Рисунок 5–Зависимости  $\epsilon_m$  от  $\alpha_b$  образцов исследуемых материалов

Результаты моделирования показали, что погрешность определения коэффициентов теплопроводности исследуемых материалов  $\epsilon_m$  не превышает 2,5 %.

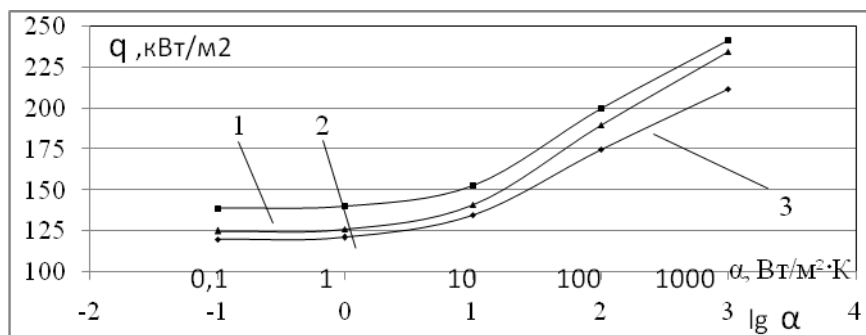
Влияние отвода тепла через боковую поверхность образца на точность определения теплопроводности показано на рисунке 6.



1– кварцевая керамика; 2– стеклокерамика; 3– нитрид кремния

Рисунок 6 – Зависимость  $\epsilon_m$  определения коэффициента теплопроводности от коэффициента теплоотдачи боковой поверхности образца  $\alpha_x$

Расчёты, выполненные по трёхмерной модели радиационно-кондуктивного теплообмена в горячей зоне установки, показали, что обеспечение плотности поглощённого образцом теплового потока до 200 кВт/м<sup>2</sup> может быть реализовано блоком однорядных ламповых нагревателей и темп нагрева фронтальной поверхности образца в пределах 2,5–10 град/с является достижимым. Анализ результатов позволил ограничить дальнейшие исследования темпом нагрева поверхности в 5 град/с.



1 – стеклокерамика; 2 – нитрид кремния; 3 – кварцевая керамика

Рисунок 7–Зависимости максимальной плотности теплового потока, поглощённого образцами исследуемых материалов толщиной 7 мм, от



коэффициента теплоотдачи тыльной поверхности  $\alpha$  для темпа нагрева 5K/c

Изложенный выше подход дает возможность оптимизировать теплофизический эксперимент выбором толщины и режима нагрева образца исследуемого материала.

В связи с необходимостью установки термопар в образец были рассмотрены два варианта его формирования:

в виде трёхслойного набора пластин, укладываемых одна на другую с закреплёнными в пазах на поверхностях контакта пластин термопарами;

в виде набора стержней квадратного сечения, соединённых боковыми поверхностями друг с другом в пластину с установленными в боковых пазах стержней на разной глубине термопарами.

Расчёты показали, что  $\varepsilon_m$  для многослойной пластины превышает 61%. Пластина из стержней является оптимальной и даёт возможность применить статистико-вероятностный подход к определению искомой характеристики.

Трёхмерная модель сопряжённого радиационно-кондуктивного теплообмена между элементами нагревательной установки позволила определить температурное поле поверхности образца и зону размещения термопар (см. рисунки 8,9).

Приведённые на рисунке 9 изотермы имеют симметричные относительно системы координат конфигурации, а градиент температур в зоне расположения термопар не превышает 7 К.

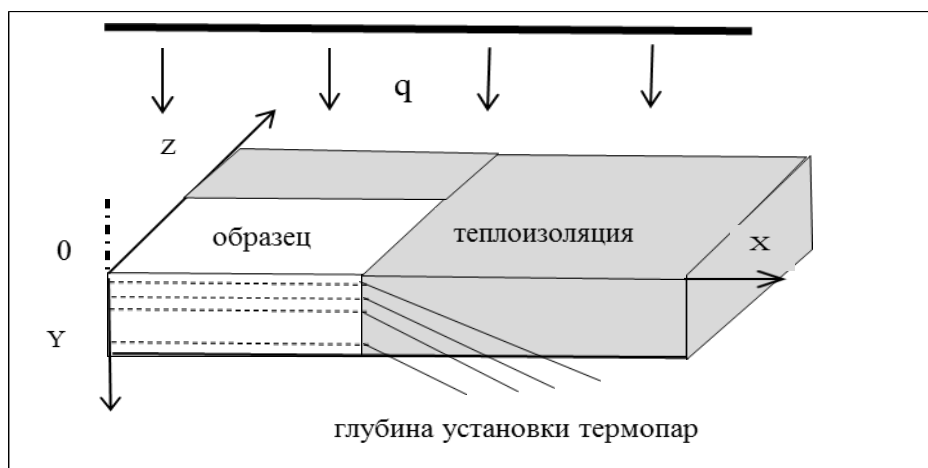
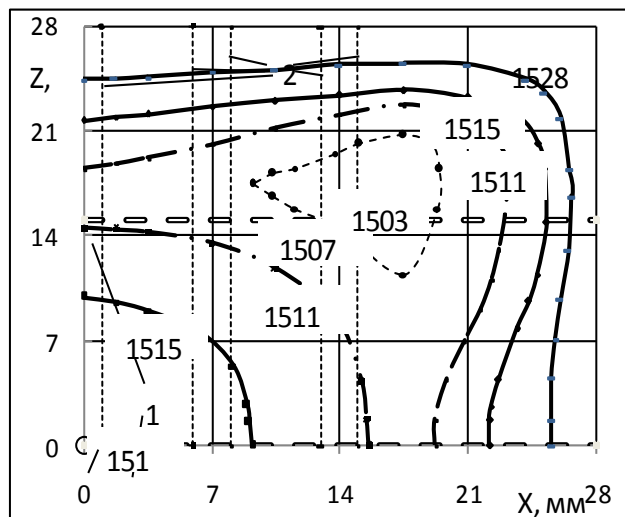


Рисунок 8 – Схема зоны нагрева образца в системе координат



- 1 – лампы блока нагревателей, находящихся в зоне образца;  
 2 – термопары в образце

Рисунок 9– Распределение изотерм на фронтальной поверхности образца из кварцевой керамики на 240 с режима нагрева

В рамках исследования рассмотрено влияние условий теплового контакта между стержнями, составляющими образец, на однородность температурного поля в нём. Показанные на рисунке 10 демонстрационные распределения температур в керамических образцах соответствуют условиям как плотного теплового контакта между элементами образца, так и наличия воздушного зазора между ними (индекс 3).

Выполненные расчёты по оценке методических погрешностей показали, что они возросли до 3,8 % и 4,2% для обоих вариантов укладки при коэффициенте теплоотдачи тыльной поверхности  $\alpha_t = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ . Появление в теплопередаче боковой составляющей увеличивает эти погрешности до  $\varepsilon_m = 4,3 \%$  и 4,9% соответственно.

Аналогичные распределения температур в процессе нагрева происходят и в образцах из нитрида кремния и стеклокерамики.

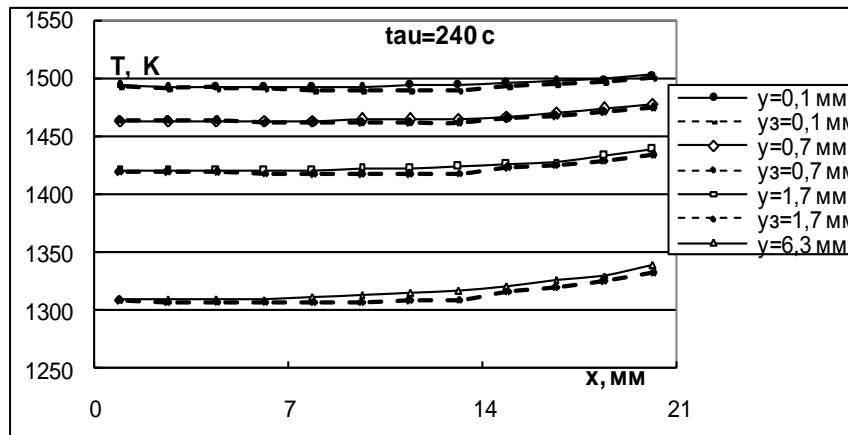
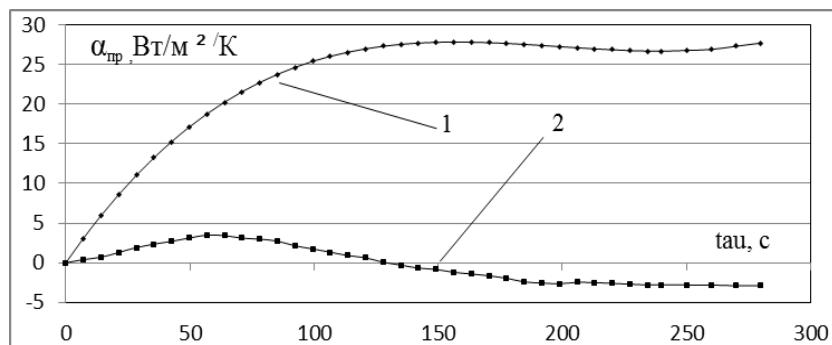


Рисунок 10– Распределение температур в образце из кварцевой керамики на глубинах установки термопар на 240 с режима нагрева

Присутствие в реальном теплофизическом эксперименте бокового теплопереноса подтверждают расчёты средних значений коэффициентов теплоотдачи тыльной и боковой поверхности образца, выполненные по показаниям термопар (см. рисунок 11).



1, 2–коэффициенты теплоотдачи тыльной  $\alpha_b$  и боковой  $\alpha_x$  поверхности образца соответственно

Рисунок 11– Изменения  $\alpha_{прив}$  при испытаниях

Термопары, устанавливаемые в образец, вносят погрешность в измерения температур и увеличивают методическую погрешность определения теплопроводности. На точность определения  $\lambda$  могут влиять как взаимное расположение их в образце, так и условия теплового контакта термопар с материалом образца. Анализ результатов установки термопар в пазы образца указывает на три варианта теплового контакта: полный контакт термопары с образцом, контакт с наличием воздушного бокового зазора не

превышающего её диаметр, контакт с боковым зазором в виде щели протяжённостью более 3 диаметров.

Проведённые исследования показали, что для образца из кварцевой керамики при вертикальном расположении термопар одна под другой  $\epsilon_m$  не превышает 6 %, при их смещении одна от другой по горизонтали на 0,4 мм – 5 %, при смещении на 0,2 мм – 4 %. Для стеклокерамики – 7 %, 6 %, 4% соответственно. Для керамики из нитрида кремния – 7 %, 4 %, 3 %.

При воздушном боковом зазоре, превышающем 0,3 мм  $\epsilon_m = 42$  % для кварцевой керамики,  $\epsilon_m = 48$  % для стеклокерамики,  $\epsilon_m = 20,5$  % для керамики из нитрида кремния.

**В третьей главе** описаны работы по созданию автоматизированного стенда теплофизического исследований. Приведены результаты тепловых расчётов элементов установки радиационного нагрева. Показаны распределения температурных полей в рабочей зоне образца. Оценены зависимости погрешности системы управления стенда от способа заделки управляющей термопары в образце. Приведены технические характеристики, описано программное обеспечение стенда. Отмечено совпадение предельных расчетных и экспериментальных показателей мощности для максимальной температуры и темпа нагрева образца.

На рисунке 12 приведена схема стенда теплофизических исследований, а на рисунке 13 показана горячая зона установки.

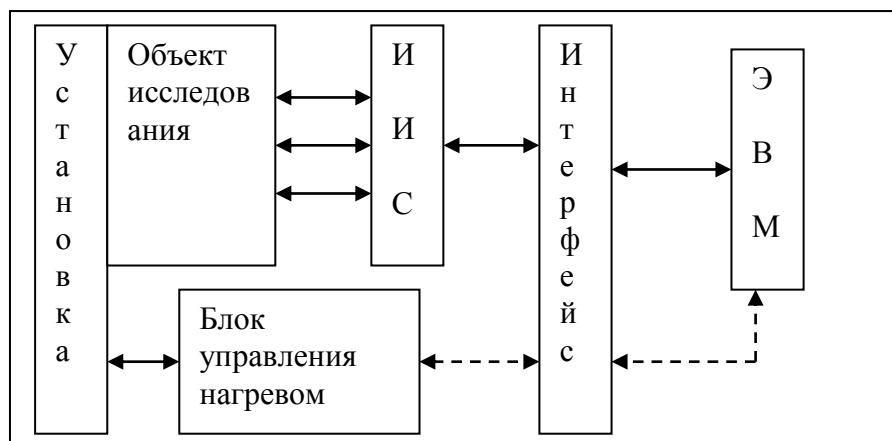


Рисунок 12– Структурная схема автоматизированного стенда

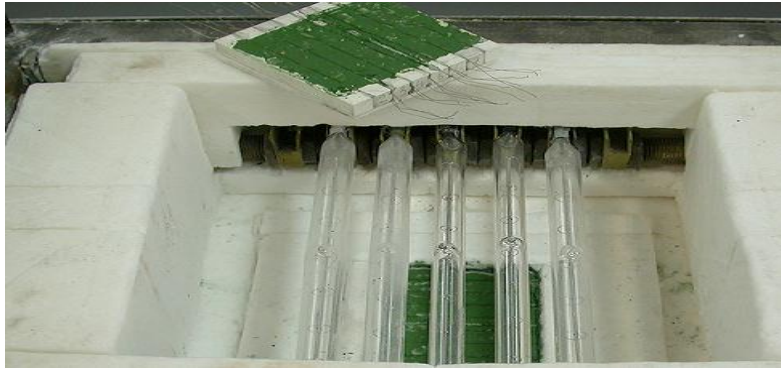


Рисунок 13– Рабочее пространство установки с однорядными нагревателями и подготовленный образец исследуемого материала

**В четвертой главе** изложены методика подготовки и проведения испытаний для определения коэффициента теплопроводности керамических материалов в области температур от 300 до 1500 К при одностороннем радиационном нагреве и результаты теплофизических исследований конструкционных керамических материалов.

Для кварцевой керамики режим испытаний достигал 1673К, для керамики из нитрида кремния – 1573 К, а для стеклокерамики – 1473 К.

Проведённые по результатам экспериментов расчёты эффективных коэффициентов теплопроводности образцов исследуемых материалов показали, что для кварцевой керамики  $\epsilon_{\lambda}= 10\%$ ,  $\epsilon_{\text{м}}= 6\%$ ,  $\epsilon_{\text{сл}}= 8\%$ ; для стеклокерамики  $\epsilon_{\lambda}= 11\%$ ,  $\epsilon_{\text{м}}= 7\%$ ,  $\epsilon_{\text{сл}}=8,5\%$ ; для керамики из нитрида кремния  $\epsilon_{\lambda}=11 \%$ ,  $\epsilon_{\text{м}}= 6 \%$ ,  $\epsilon_{\text{сл}}=9,1 \%$ .

На рисунках 14 – 16 приведены результаты определения эффективных коэффициентов теплопроводности исследуемых материалов применяемыми в практике теплофизических исследований керамических материалов методами: 1 – лазерной вспышки; 2 – квазистационарный; 3 – одностороннего нагрева; 4 – импульсный. Они показали, что полученные результаты зависят от применяемого метода, модели расчёта искомой характеристики, на правомерность применения которой могут влиять структурные особенности материала образца, включая его пористость и

оптические свойства. В целом их расхождение не превышает 11%.

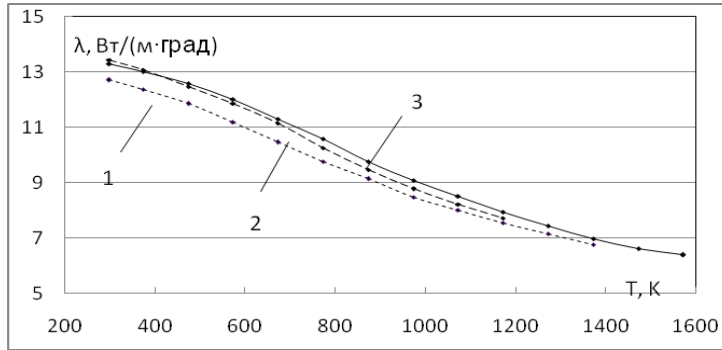


Рисунок 14– Температурные зависимости  $\lambda$  керамики из нитрида кремния

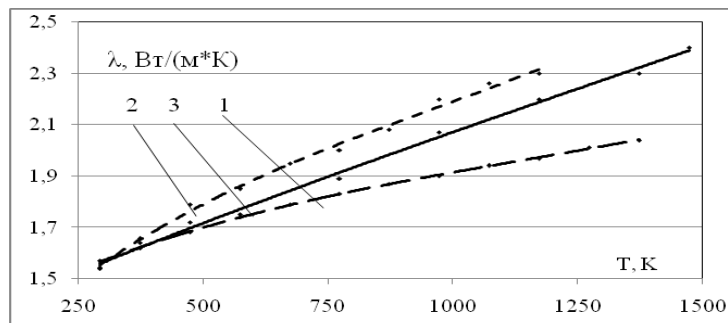


Рисунок 15– Температурные зависимости  $\lambda$  стеклокерамики

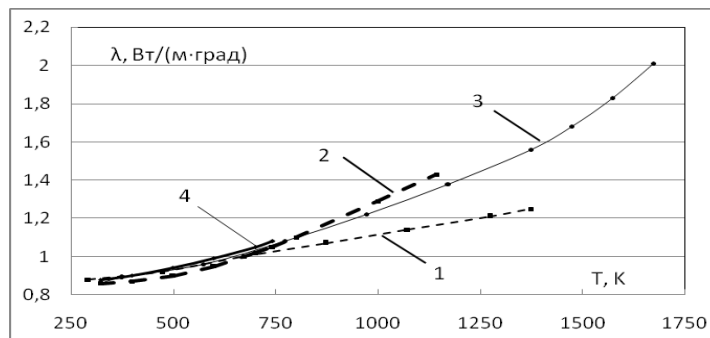


Рисунок 16 – Температурные зависимости  $\lambda$  кварцевой керамики

**В заключении** представлены, результаты проделанной работы.

1. Впервые при исследовании теплопроводности керамических материалов обоснован подход к оптимизации теплофизического эксперимента по последовательно применяемым критериям на условиях минимизации затрат.

2. Разработан комплекс математических моделей теплообмена в керамических конструкционных материалах, обеспечивший оптимизацию теплофизического эксперимента по форме и размерам образцов исследуемых материалов, режимам их испытаний, конструкции установки

радиационного нагрева.

3. Предложен расчёт погрешности определения теплопроводности материала по статистико-вероятностным критериям оценки.

4. Разработана методика определения теплопроводности керамических материалов при температурах от нормальной до 1500 К и темпе нагрева 5 К/с, получены новые расчетно-экспериментальные данные о коэффициентах теплопроводности керамики на основе диоксида кремния и нитрида кремния марок НИАСИТ-8ПП, ОТМ-357, ОТМ-904, с погрешностью, не превышающей 7%.

5. Создан автоматизированный стенд теплофизических исследований керамических материалов с установкой одностороннего радиационного нагрева образцов в области температур 300-1673 К и темпом нагрева до 50 град/с, удовлетворяющий условиям высокопроизводительных экспериментов с сохранением представительных свойств исследуемых материалов.

6. Вся совокупность новых инструментов исследования, включая математические модели, алгоритмы, методику, автоматизированный стенд и другое испытательное оборудование, используются при определении коэффициентов теплопроводности опытных керамических материалов для антенных обтекателей в ОАО «ОНПП Технология». В итоге удалось передвинуть верхнюю границу температурного диапазона определения коэффициента теплопроводности керамических материалов с 1100 до 1673К, более чем в 100 раз сократить время проведения эксперимента, в 25 раз уменьшить расход электроэнергии, потребляемой нагревателями.

#### **Публикации в журналах из списка ВАК:**

1. Анучин, С.А. Методика высокотемпературных исследований теплофизических свойств керамических материалов аэрокосмического назначения / С.А. Анучин, Г.Н. Серeda, П.А. Степанов. // Огнеупоры и техническая керамика. – 2010. – №4, 5. – С. 41– 45.

2. Резник, С.В. Метод измерения температуры поверхности обтекателей ракет контактными датчиками при стендовых тепловых испытаниях / С.В. Резник., Г.Н. Середа, А.В. Шуляковский. // Тепловые процессы в технике. – 2011. – Т.3, № 6. – С. 278–288.

3. Estimation of thermocouple measurement errors for the ceramic specimen surface temperature in thermal tests / G. Sereda, A. Shulyakovskiy, O. Duriex // Int.J.Engineering Systems Modelling and Simulation.2012. Vol. 4, No. 4, P. 181-189.

**Список опубликованных по тематике диссертации работ:**

4. Русин, М.Ю. Автоматизированная установка определения теплофизических свойств неэлектропроводных материалов при одностороннем скоростном нагреве / М.Ю. Русин, Г.Н. Середа и др.// Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов: Сб. тез. докл. XVII Междунар. науч.- техн. конф. – Обнинск, 2004. – С. 64–68.

5. А.С. RU 1594501 G 05 D 23/19. Устройство для измерения и регулирования температуры поверхности объекта/ Г.Н. Середа, Ю.А. Грацианский.

6. Середа, Г.Н. Исследования по применению решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности к определению теплофизических свойств керамических материалов в условиях одностороннего нагрева / Г.Н. Середа, С.В. Резник, М.Ю. Русин // Сб. тез. докл. XVII Междунар. науч.-техн. конф. «Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов». – Обнинск, 2004. – С. 62–64.

7. Середа, Г.Н. Оптимизация параметров эксперимента при определении теплофизических свойств материалов на основе имитационной модели / Г.Н. Середа. // Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов: Сб. тез. докл. XVII Междунар. науч.- техн. конф. – Обнинск, 2004. – С. 157–159.



8. Резник, С.В. Определение теплофизических свойств конструкционных керамических материалов на основе решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности / С.В. Резник, М.Ю. Русин, П.В. Просунцов, Г.Н. Серeda. // Сб. тез.докл. XXVII Сибирского теплофизического семинара, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе. – М.: Новосибирск, 2004. – С. 134-135.
9. Серeda, Г.Н. К вопросу повышения эффективности процесса определения теплофизических свойств конструкционных керамических материалов / Г.Н. Серeda, С.В. Резник, М.Ю. Русин, П.В. Просунцов. // Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий (МЕЕ-2004): Сб. тез.докл. III междунар. конф. – Киев, 2004. – С. 224.
10. Русин, М.Ю. Определение теплофизических свойств керамических материалов АО в области температур от нормальной до  $1200^{\circ}\text{C}$  в условиях одностороннего нагрева методом решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности / М.Ю. Русин, Г.Н. Серeda // Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий (МЕЕ-2004): Сб. тез.докл. III междунар. конф. – Киев, 2004. – С.231.
11. Резник, С.В. Автоматизированный комплекс для высокотемпературных исследований теплофизических характеристик керамических материалов / С.В. Резник, А.С. Хамицаев, С.А. Анучин, Г.Н. Серeda, П.А. Степанов. // Ракетная космическая техника (РКТ-05): Сб. тез. докл. междунар. конф. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2005. – С. 172–174.
12. Забейайлов, М.О. Сравнительный анализ различных методов определения коэффициента теплопроводности в частично прозрачном материале на основе кварцевого стекла / М.О. Забейайлов, С.А. Анучин, Г.Н. Серeda. // Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства

и утилизации изделий (МЕЕ-2010): Сб. тез. докл. VI междунар. конф. – Киев, 2010. – С. 197.

13. Estimation of thermocouple measurement methodological errors for the ceramic specimen surface in thermal tests / G. Sereda, A. Shulyakovskiy // Proc. 1-st Int. Workshop on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications (Wrexham, Nord Wales, UK, May 9-11, 2011).– P. 61-81.