

Титов Дмитрий Михайлович

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ ТЕПЛООБМЕНА В НЕРАЗРУШАЕМЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ И
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ**

Специальность: 01.04.14 – "Теплофизика и теоретическая теплотехника"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Ненарокомов Алексей Владимирович

Официальные оппоненты:

Ревизников Дмитрий Леонидович, доктор физико-математических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ), профессор;

Просунцов Павел Викторович, кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана, доцент.

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие
"Центральный аэрогидродинамический институт имени
профессора Н.Е. Жуковского" (ЦАГИ)

Защита состоится « 18 » июня 2012 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по адресу 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба прислать по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) «МАИ». Ученый совет МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета) «МАИ»

Автореферат разослан «__» мая 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.08
д.т.н., профессор

 Зувев Ю.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Современное развитие ракетно-космической техники привело к значительному усложнению экспериментальных исследований тепловых процессов, протекающих в конструкциях космических аппаратов (КА), что привело к необходимости использования обоснованных математических моделей различных уровней детализации, позволяющих с требуемой точностью прогнозировать тепловое состояние теплозащитных и теплоизоляционных материалов и конструкций на различных стадиях разработки КА, что является важнейшим условием успешного решения задачи выбора оптимальных параметров системы тепловой защиты. Как показывает опыт, в основу методов решения подобных задач может быть положена методология обратных задач теплообмена (ОЗТ), а в ряде случаев обратные задачи являются практически единственным средством получения необходимых результатов. Общая методика исследования, принятая в диссертационной работе, базируется на использовании и обобщении опыта решения обратных задач теплопроводности, достижениях в области численных методов теплообмена, оптимизации, решения некорректных задач математической физики.

Цель работы.

Из всего комплекса проблем, возникающих и требующих своего решения при создании надежных теплонагруженных конструкций, в данной работе анализируется проблема отработки неразрушаемых теплозащитных покрытий (ТЗП) КА. Целью диссертации является разработка и применение экстремальных методов решения обратных задач математической физики для идентификации математических моделей теплопереноса в системах неразрушаемой теплозащиты и теплоизоляции.

Научная новизна.

Научная новизна работы определяется впервые реализованным подходом к проблеме применения методологии обратных задач при одновременном определении теплофизических и радиационных характеристик исследуемого материала и параметров экспериментальной установки (температурных зависимостей коэффициента теплопроводности $\lambda(T)$, объемной теплоемкости $c(T)$ и интегральной степени черноты $\varepsilon(T)$ материала и интегральной степени черноты нагревателя $\varepsilon_h(T)$), а также определении теплофизических характеристик высокопористого хрупкого теплоизоляционного материала без установки внутренних термопар в исследуемых образцах.

Практическая ценность результатов.

Практическими результатами работы стал новый метод исследования теплофизических и радиационно-оптических характеристик теплозащитных материалов и многослойных покрытий КА, разработанный на основе методологии обратных задач, и реализованный в виде программного комплекса.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается

- использованием фундаментальных законов сохранения энергии и радиационного переноса, а также использованием апробированных численных методов решения многопараметрических задач;
- всесторонним тестированием разработанных алгоритмов и программ с целью обоснования достоверности получаемых результатов и сходимости решений;
- сравнением результатов решения ОЗТ с реальными экспериментальными данными.

Личный вклад автора.

- Разработана однородная разностная схема для расчета теплопереноса в многослойной конструкции, в том числе для случая неидеальных контактов между слоями.
- Получено решение задачи идентификации математической модели радиационно-кондуктивного теплообмена в системе образец материала – радиационный нагреватель.
- Построена математическая модель процесса теплопереноса теплоизоляционного материала на основе вспененного углерода путем решения коэффициентной обратной задачи без установки внутренних термодатчиков.

Апробация и внедрение результатов.

Основные положения работы и отдельные ее результаты докладывались, обсуждались и были одобрены на Минском международном форуме по тепло- и массообмену (2008), Международной конференции "Обратные задачи: Идентификация, Проектирование и Управление" (Казань, 2007; Самара, 2010), Международной конференции "Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice" (Париж, 2008; Орландо, 2011) и ряде других.

Публикации по теме работы:

Основные положения работы и отдельные ее результаты были опубликованы в журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ перечень изданий. По результатам выполненных исследований, посвященных теме диссертации, опубликовано более 20 печатных работ, выпущено более 10 научно-технических отчетов.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников и приложения.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость работы. Сформулированы цель и задачи исследований. Представлены основные научные положения. Дается описание структуры и содержания диссертации. Дана общая характеристика тематики диссертационной работы.

В первой главе рассматриваются общие методические вопросы проблемы создания обоснованных математических моделей теплопереноса в элементах

конструкции из неразрушаемых материалов. Базируясь на результатах проведенного анализа, предлагается общая процедура построения приближенных моделей теплопереноса; формулируются цели и задачи исследования; приводятся формализованные постановки задачи идентификации математических моделей теплообмена; анализируются общие закономерности используемых для этого математических моделей; обоснована необходимости достоверной идентификации этих моделей.

В работе математическая модель (ММ) рассматривается как абстрактное средство приближенного представления (отображения) реального процесса с целью его исследования и является математическим описанием существенных факторов процесса и взаимосвязей между ними. Для выбора, корректировки и проверки состоятельности математической модели широко используются экспериментальные исследования. Окончательное уточнение математической модели происходит во время натурных испытаний системы. В работе не ставилась задача законченного анализа используемых в настоящее время ММ теплопереноса в технических системах, поэтому были рассмотрены некоторые наиболее типичные формы представления математических моделей и выявлены наиболее существенные закономерности их структуры.

Для динамических систем с распределенными параметрами математическая модель имеет вид:

$$\bar{T}(\bar{x}, \tau) = L(\bar{x}, \tau, \bar{z})q(\bar{x}, \tau), \quad \bar{x} \in \Omega, \tau \in [0, \tau_{\max}] \quad (1)$$

где \bar{x} – пространственная координата, τ – время, Ω – пространственная область, определяемая геометрическими размерами исследуемой системы, τ_{\max} – время, в течение которого осуществляется моделирование поведения системы. Оператор $L(\bar{x}, \tau, \bar{z})$ формируется в виде краевых задач для эволюционных уравнений в частных производных.

В случае одномерной постановки модель нестационарного теплообмена в многослойном теплозащитном покрытии конструкции может быть представлена в виде следующей краевой задачи:

$$C_l \frac{\partial T_l}{\partial \tau} = \frac{1}{x^\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^\nu \lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial x} \right) + Q_l \frac{\partial T_l}{\partial x} + S_l,$$

$$x_{l-1} < x < x_l, \quad 0 < \tau \leq \tau_{\max}, \quad l = \overline{1, L}, \quad x_l = x_0 + \sum_{i=1}^l \Delta_i, \quad (2)$$

$$T_l(x, 0) = T_{0,l}(x), \quad x_{l-1} \leq x \leq x_l, \quad (3)$$

$$T_j(x, 0) = T_{0,j}(x), \quad \ell_{j-1} \leq x \leq \ell_j,$$

$$\alpha_1 \lambda_1 \frac{\partial T_1(x_0, \tau)}{\partial x} + \beta_1 T_1(x_0, \tau) = q_1(\tau) \quad (4)$$

$$\lambda_j \frac{\partial T_j(\ell_j, \tau)}{\partial x} = \lambda_{j+1} \frac{\partial T_{j+1}(\ell_j, \tau)}{\partial x}, \quad j = \overline{1, n-1} \quad (5)$$

$$-R_j \lambda_j \frac{\partial T_j(\ell_j, \tau)}{\partial x} = T_j(\ell_j, \tau) - T_{j+1}(\ell_j, \tau), \quad j = \overline{1, n-1} \quad (6)$$

$$\alpha_2 \lambda_L \frac{\partial T_L(x_L, \tau)}{\partial x} + \beta_2 T_L(x_L, \tau) = q_2(\tau) + H(T_L(x_L, \tau), \tau) \quad (7)$$

где T – температура, ν – параметр, определяющий систему координат и равный 0, 1 и 2 для декартовой, цилиндрической и сферической системы соответственно, L – количество слоев, Δ_l – толщина l -го слоя, C_l , λ_l , Q_l , S_l – коэффициенты,

определяющие тепловые характеристики материала l -го слоя, $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ - параметры, равные 0 или 1 и позволяющие получить на внешних поверхностях граничные условия первого, второго или третьего рода, R_j - контактное сопротивление на j -ой внутренней границе, H - функции теплового баланса на правой границе

Подобная модель позволяет за счет ее коэффициентов учесть различные механизмы теплопереноса в анализируемой системе: накопление тепла, теплопроводность, конвективный теплоперенос и поглощение или выделение тепла. Если какой-либо процесс отсутствует в конкретном слое, то соответствующий коэффициент следует задать равным нулю. Поэтому приведенная модель дает возможность анализировать температурные режимы конструкций из разнородных материалов с различным характером протекающих в них процессов теплопереноса.

Вторая глава посвящена разработке алгоритма решения ОЗТ на основе метода итерационной регуляризации, показавшего свою высокую эффективность при решении различных обратных задач теплопроводности. Обосновывается применение итерационных методов идентификации математических моделей. Обосновывается целесообразность предварительной параметризации искомых функций. Приводится постановка сопряженной задачи для вычисления градиента функционала невязки. Обосновывается применение сплайн-аппроксимации при решении ОЗТ. Определяются параметры градиентного метода минимизации.

В силу некорректности обратных задач для их решения необходимо использовать специальные регуляризирующие методы и алгоритмы, обеспечивающие устойчивые приближенные решения. В работе регуляризирующие алгоритмы строятся на основе метода итерационной регуляризации, показавшем свою высокую эффективность в практике решения различных обратных задач теплообмена. Так же важным вопросом является единственность решения соответствующей обратной задачи. В работе предлагается для обеспечения единственности решения одновременно обрабатывать данные нескольких экспериментов с различным внешним тепловым воздействием.

Анализируемую обратную задачу можно представить в виде операторного уравнения первого рода

$$A\bar{u} = \bar{f}, \bar{u} \in U, \bar{f} \in F, A: U \rightarrow F \quad (8)$$

где оператор A строится на основании модели исследуемого процесса (2) - (7), а правая часть \bar{f} формируется с использованием экспериментальных данных, т.е. при решении обратных задач преобразование Au в уравнении (8) представляет собой функцию теплового состояния анализируемой системы, вычисленную в точках установки термодатчиков. Формируется функционал невязки

$$J(u) = \|A\bar{u} - \bar{f}\|_F \quad (9)$$

и рассматривается задача его минимизации относительно \bar{u} .

При использовании данного итерационного алгоритма регуляризирующее условие останова выбирается в соответствии с принципом обобщенной невязки

$$s^* : J(u^{s^*}) \cong \varepsilon(h, \delta), \quad (10)$$

пропорциональной величине, обратной номеру последней итерации.

Важнейшей частью итерационных алгоритмов решения обратных задач теплообмена является вычисление градиента функционала невязки. Реализация этой

процедуры во многом определяет общую эффективность вычислительных алгоритмов и расчетных методик.

Предположим внутри исследуемого образца установлены M термопар
 $T_{\text{exp}}(X_{l,m}, \tau) = f_{l,m}(\tau)$, $m = 1, M_l$, $l = 1, L$ (11)

Функционал невязки, характеризующий среднеквадратичное отклонение рассчитанных температур в точках установки термопар от экспериментально измеренных значений, имеет следующий вид:

$$J(C, \lambda, \varepsilon) = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^{M_l} \int_0^{\tau_m} \chi_{l,m}(\tau) [T(X_{l,m}, \tau) - f_{l,m}(\tau)]^2 d\tau \quad (12)$$

Искомые зависимости в параметрической форме можно представить в следующем виде:

$$C_L(T) = \sum_{k=1}^{N_C} C_k \varphi_k(T); \quad \lambda_L(T) = \sum_{k=1}^{N_\lambda} \lambda_k \varphi_k(T), \quad \varepsilon_L(T) = \sum_{k=1}^{N_\varepsilon} \varepsilon_k \varphi_k(T) \quad (13)$$

где в качестве базисных функций используется система кубических В-сплайнов.

Тогда выражения для составляющих градиента функционала невязки:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial \lambda_k} &\equiv J'_{\lambda_k} = \sum_{m=1}^{M_l+1} \int_0^{X_{L,m}} \int_{X_{L,m-1}}^{X_{L,m}} \psi_{L,m} \left[\frac{\partial^2 T_{L,m}}{\partial x^2} \varphi_k(T) + \left(\frac{\partial T_{L,m}}{\partial x} \right)^2 \frac{d\varphi_k(T)}{dT} + \frac{v}{x} \frac{\partial T_{L,m}}{\partial x} \varphi_k(T) \right] dx d\tau + \\ &+ \int_0^{\tau_{\max}} \psi_{L,1}(X_{L-1}, \tau) \frac{\partial T_{L,1}(X_{L-1}, \tau)}{\partial x} \varphi_k(T_{L,1}(X_{L-1}, \tau)) d\tau - \\ &- \int_0^{\tau_m} \psi_{L,M_L+1}(X_L, \tau) \frac{\partial T_{L,M_L+1}(X_L, \tau)}{\partial x} \varphi_k(T_{L,M_L+1}(X_L, \tau)) d\tau, \\ k &= \overline{1, N_\lambda} \\ \frac{\partial J}{\partial C_k} &\equiv J'_{C_k} = - \sum_{m=1}^{M_l+1} \int_0^{\tau_{\max}} \int_{X_{L,m-1}}^{X_{L,m}} \psi_{L,m}(x, \tau) \frac{\partial T_{L,m}}{\partial \tau} \varphi_k(T) dx d\tau, \quad k = \overline{1, N_C}; \\ \frac{\partial J}{\partial \varepsilon_k} &\equiv J'_{\varepsilon_k} = - \int_0^{\tau_{\max}} \psi_{L,M_L+1}(X_L, \tau) \sigma T_{L,M_L+1}^4(X_L, \tau) \varphi_k(T(X_L, \tau)) d\tau, \quad k = \overline{1, N_\varepsilon}. \end{aligned} \quad (14)$$

Вводится в рассмотрение сопряженная краевая задача

$$C_l(T) \frac{\partial \psi_{l,m}}{\partial \tau} = \frac{1}{x^\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^\nu \lambda_l(T) \frac{\partial \psi_{l,m}}{\partial x} \right) - \left(\frac{d\lambda_l}{dT} \frac{\partial T_{l,m}}{\partial x} + \frac{2\nu}{x} \lambda_l \right) \frac{\partial \psi_{l,m}}{\partial x} + \left(\frac{\nu}{x^2} \lambda_l \right) \psi_{l,m} \quad (15)$$

$$X_{l,m-1} < x < X_{l,m}, \quad 0 \leq \tau < \tau_{\max}$$

$$\psi_{l,m}(x, \tau_{\max}) = 0, \quad X_{l,m-1} \leq x \leq X_{l,m}$$

$$\begin{aligned} &\alpha_1 \lambda_1(T_{1,1}(X_0, \tau)) \frac{\partial \psi_{1,1}(X_0, \tau)}{\partial x} + \\ &+ \left[\beta_1 + \alpha_1 \frac{\nu}{X_0} \lambda_1(T_{1,1}(X_0, \tau)) - \frac{\partial q_1(T_{1,1}(X_0, \tau), \tau)}{\partial T} \right] \psi_{1,1}(X_0, \tau) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\lambda_l(T_{l,m}(X_{l,m}, \tau)) \left[\frac{\partial \psi_{l,m}(X_{l,m}, \tau)}{\partial x} - \frac{\partial \psi_{l,m-1}(X_{l,m}, \tau)}{\partial x} \right] = 2\chi_{l,m}(\tau) [T_{l,m}(X_{l,m}, \tau) - f_{l,m}(\tau)], \quad (17)$$

$$m = \overline{1, M_l}, \quad l = \overline{1, L}$$

$$\psi_{l,m}(X_{l,m}, \tau) = \psi_{l,m}(X_{l,m}, \tau), \quad m = \overline{1, M_l}, \quad l = \overline{1, L} \quad (18)$$

$$R(T_{1, M_1+1}(X_1, \tau)) \lambda_L(T_{L,1}(X_1, \tau)) \frac{\partial \psi_{L,1}(X_1, \tau)}{\partial x} =$$

$$= \left[1 + \left(\frac{\nu}{X_1} \lambda_L(T_{L,1}(X_1, \tau)) \right) \right] \psi_{L,1}(X_1, \tau) - \psi_{1, M_1+1}(X_1, \tau) \quad (19)$$

$$\lambda_l(T_{l, M_l+1}(X_l, \tau)) \frac{\partial \psi_{l, M_l+1}(X_l, \tau)}{\partial x} = \lambda_L(T_{L,1}(X_l, \tau)) \left[\lambda_l(T_{l, M_l+1}(X_l, \tau)) \frac{\partial T_{l, M_l+1}(X_l, \tau)}{\partial x} R'(T_{l, M_l+1}(X_l, \tau)) + 1 - \right.$$

$$\left. - \frac{\nu}{X_l} \lambda_l(T_{l, M_l+1}(X_l, \tau)) R(T_{l, M_l+1}(X_l, \tau)) \right] \frac{\partial \psi_{L,1}(X_l, \tau)}{\partial x} - \quad (20)$$

$$- \left[\frac{\nu}{X_l} \lambda_l(T_{l, M_l+1}(X_l, \tau)) \lambda_L(T_{L,1}(X_l, \tau)) \frac{\partial T_{l, M_l+1}(X_l, \tau)}{\partial x} \frac{dR_l}{dT}(T_{l, M_l+1}(X_l, \tau)) + \right.$$

$$\left. + \frac{\nu}{X_l} \lambda_L(T_{L,1}(X_l, \tau)) - \frac{\nu}{X_l} \lambda_l(T_{l, M_l+1}(X_l, \tau)) - \frac{\nu^2}{X_l^2} \lambda_l(T_{l, M_l+1}(X_l, \tau)) \lambda_L(T_{L,1}(X_l, \tau)) R(T_{l, M_l+1}(X_l, \tau)) \right] \psi_{L,1}(X_l, \tau)$$

$$\alpha_2 \lambda_L(T_{L, M_L+1}(X_L, \tau)) \frac{\partial \psi_{L, M_L+1}(X_L, \tau)}{\partial x} + \left(\beta_2 + \frac{\nu}{X_L} \lambda_L(T_{L, M_L+1}(X_L, \tau)) - \frac{\partial q_2(T_{L, M_L+1}(X_L, \tau), \tau)}{\partial T} - \right.$$

$$\left. - \frac{d\varepsilon_L}{dT}(T_{L, M_L+1}(X_L, \tau)) \sigma T_{L, M_L+1}^4(X_L, \tau) - 4\varepsilon_L(T_{L, M_L+1}(X_L, \tau)) \sigma T_{L, M_L+1}^3(X_L, \tau) \right) \psi_{L, M_L+1}(X_L, \tau) = 0 \quad (21)$$

где $\lambda_L(T)$, $C_L(T)$ и $\varepsilon_L(T)$ - искомые зависимости.

Если на границах образца установлены дополнительные термопары, граничные условия следует переписать в следующем виде:

$$\alpha_1 \lambda_1(T_{1,1}(X_0, \tau)) \frac{\partial \psi_{1,1}(X_0, \tau)}{\partial x} + \left[\beta_1 + \alpha_1 \frac{\nu}{X_0} (T_{1,1}(X_0, \tau)) - \frac{\partial q_1(T_{1,1}(X_0, \tau), \tau)}{\partial T} \right] \psi_{1,1}(X_0, \tau) =$$

$$= \chi_{1,1}(\tau) [T_{1,1}(X_0, \tau) - f_{1,1}(X_0, \tau)] \quad (22)$$

$$\alpha_2 \lambda_L(T_{L, M_L}(X_L, \tau)) \frac{\partial \psi_{L, M_L}(X_L, \tau)}{\partial x} + \left(\beta_2 + \alpha_2 q_2(T_{L, M_L}(X_L, \tau)) - \frac{\partial q_2(T_{L, M_L}(X_L, \tau), \tau)}{\partial T} - \right.$$

$$\left. - \frac{d\varepsilon_L}{dT}(T_{L, M_L+1}(X_L, \tau)) \sigma T_{L, M_L+1}^4(X_L, \tau) - 4\varepsilon_L(T_{L, M_L+1}(X_L, \tau)) \sigma T_{L, M_L+1}^3(X_L, \tau) \right) \psi_{L, M_L}(X_L, \tau) =$$

$$= \chi_{L, M_L}(\tau) [T_{L, M_L}(X_L, \tau) - f_{L, M_L}(X_L, \tau)] \quad (23)$$

Таким образом, приведенные соотношения позволяют построить алгоритмы определения градиента функционала невязки при произвольных граничных условиях и любой схеме расстановки термопар.

Третья глава посвящена рассмотрению вопросов разработки вычислительных алгоритмов, предназначенных для численного решения задач идентификации при наличии излучения с одной из поверхностей многослойной конструкции. Предлагаемый подход основывается на введении в рассмотрение обобщенной математической модели в виде краевой задачи для нелинейного параболического уравнения второго порядка в одномерной по пространственной переменной многослойной области с произвольными граничными условиями на внешних

границах. Обосновывается использование метода конечных разностей при построении вычислительных алгоритмов. Приводится анализ вычислительных алгоритмов.

При решении сопряженных задач в местах установки термопар имеет место разрыв первого рода производной решения, а при решении прямых задач на границах слоев – разрыв в температуре, поэтому исследуемую многослойную пластину удобно представить в виде комбинации конечного числа многослойных пластин с разрывами в решении и производной решения на границах. Представление исходной системы в виде многослойной и введение в ее состав "фиктивных" слоев с границами, проходящими через точки установки термопар, позволяет рассматривать все три задачи в одной и той же многослойной области с достаточно общими условиями энергетического сопряжения между слоями в каждой задаче. Это также обеспечивает использование одной и той же разностной сетки для всех краевых задач.

Краевая задача для уравнения параболического типа, охватывающая все рассматриваемые случаи записывается следующим образом (для одного эксперимента):

$$C_l(T_l, x, \tau) \frac{\partial T_l}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_l(T_l, x, \tau) \frac{\partial T_l}{\partial x}) + Q_l(T_l, x, \tau) \frac{\partial T_l}{\partial x} + P_l(T_l, x, \tau) T_l + S_l(T_l, x, \tau), \quad (24)$$

$$T = T_l(x, \tau), x \in (X_{l-1}, X_l),$$

$$T_l(x, 0) = T_{l0}(x), l = \overline{1, L}, x \in [X_{l-1}, X_l];$$

$$l = \overline{1, L}, \tau \in (0, \tau_{\max}]; \quad (25)$$

$$a_0(T_1(0, \tau), \tau) \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x} + b_0(T_1(0, \tau), \tau) T_1(0, \tau) = d_0(\tau), \tau \in (0, \tau_{\max}]; \quad (26)$$

$$a_L(T_L(1, \tau), \tau) \frac{\partial T_L(1, \tau)}{\partial x} + b_L(T_L(1, \tau), \tau) T_L(1, \tau) = H(T_L(1, \tau), \tau), \quad (27)$$

$$\tau \in (0, \tau_{\max}];$$

$$a_l(T_l(1, \tau), \tau) \frac{\partial T_l(1, \tau)}{\partial x} + b_l(T_l(1, \tau), \tau) T_l(1, \tau) + d_l(T_{l+1}(0, \tau), \tau) \frac{\partial T_{l+1}(0, \tau)}{\partial x} + f_l(T_{l+1}(0, \tau), \tau) T_{l+1}(0, \tau) = \varpi_l(\tau), \quad (28)$$

$$l = \overline{1, L-1}, \tau \in (0, \tau_{\max}];$$

$$g_l(T_l(1, \tau), \tau) \frac{\partial T_l(1, \tau)}{\partial x} + h_l(T_l(1, \tau), \tau) T_l(1, \tau) + e_l(T_{l+1}(0, \tau), \tau) T_{l+1}(0, \tau) = \nu_l(\tau), l = \overline{1, L-1}, \tau \in (0, \tau_{\max}]; \quad (29)$$

$$+ e_l(T_{l+1}(0, \tau), \tau) T_{l+1}(0, \tau) = \nu_l(\tau), l = \overline{1, L-1}, \tau \in (0, \tau_{\max}];$$

где L - полное число слоев в системе (с учетом «фиктивных»).

Построение конечно-разностного аналога дифференциальной задачи осуществляется по отдельным слоям, а сопряжение решений в соседних слоях проводится с использованием конечно-разностного представления условий энергетического сопряжения

Используется разностная сетка с постоянным шагом по пространственной переменной внутри каждого слоя и постоянным шагом по времени

$$\omega_l = \{x_i = X_{l-1} + (i-1)\Delta x_l, i = \overline{1, n_{x,l} + 1},$$

$$\Delta x = (X_l - X_{l-1}) / n_{x,l}, \tau_j = j\Delta \tau, j = \overline{0, n_\tau}, \Delta \tau = \tau_m / n_\tau \}$$

Опуская индекс l конечно-разностный аналог уравнения (24) можно представить в виде:

$$C_i^j \frac{T_i^j - T_{i-1}^j}{\Delta \tau} = k_i^j \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{\lambda_{i+1}^j + \lambda_i^j}{2} \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x} - \frac{\lambda_i^j + \lambda_{i-1}^j}{2} \frac{T_i^j - T_{i-1}^j}{\Delta x} \right) + \frac{Q_i^j + |Q_i^j|}{2\lambda_i^j} \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x} \frac{\lambda_{i+1}^j + \lambda_i^j}{2} + \frac{Q_i^j + |Q_i^j|}{2\lambda_i^j} \frac{T_i^j - T_{i-1}^j}{\Delta x} \frac{\lambda_i^j + \lambda_{i-1}^j}{2} - p_i^j T_i^j + S_i^j = 0, \quad (30)$$

где $k_i^j = \frac{1}{1 + \text{Re}_i^j}$, $\text{Re}_i^j = \frac{|\Delta Q_i^j| \Delta x}{2\lambda_i^j}$ – конечно-разностное число Рейнольдса.

Используется четырехточечная чисто неявная схема. Для конечно-разностной аппроксимации граничных условий используется разностное представление первой производной функции $T(x, \tau)$ по пространственной переменной на трехточечном шаблоне.

Для получения конечно-разностного аналога условий сопряжения между слоями используется следующая аппроксимация:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}(1, \tau) \right)_{1-0} = \frac{T_{N_i-2}^j - 4T_{N_i-1}^j + 3T_{N_i}^j}{2\Delta x_i} \quad (31)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}(0, \tau) \right)_{0+0} = \frac{-T_{N_i+3}^j + 4T_{N_i+2}^j - 3T_{N_i+1}^j}{2\Delta x_{i+1}} \quad (32)$$

что позволило получить однородную разностную схему для многослойной пластины.

В результате конечно-разностной аппроксимации дифференциального оператора (30) – (32) решение исходной краевой задачи сводится к решению на каждом шаге интегрирования по времени системы алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей:

$$\left. \begin{aligned} -D_1^j T_1^j + B_1^j T_2^j &= -F_1^j, \\ A_i^j T_{i-1}^j - D_i^j T_i^j + B_i^j T_{i+1}^j &= -F_i^j, \quad i = \overline{2, N_L - 1}, \\ \Phi(T_{N_L}^L) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Данная система алгебраических уравнений наиболее эффективно решается методом прогонки с итерациями по коэффициентам.

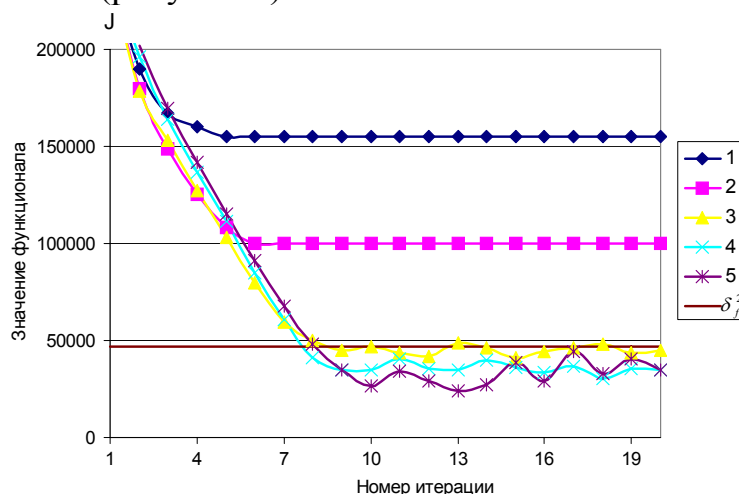
В четвертой главе анализируются свойства вычислительных алгоритмов путем математического моделирования (обработка данных вычислительного эксперимента).

Эффективное применение методов исследования теплообмена на основе решения обратных задач, требует тщательной отработки вычислительных алгоритмов, а также выбора числа одновременно обрабатываемых образцов, числа термодатчиков и т.д. Поэтому на этом этапе исследований наиболее эффективным методом исследований является вычислительный эксперимент. Анализируется вычислительная устойчивость предложенного алгоритма к различным погрешностям, а также влияние различных факторов на точность решения.

В данной работе эффективность предлагаемого алгоритма исследовалась путем обработки данных двух модельных экспериментов. Сначала решалась соответствующая прямая задача (с использованием неких исходных значений характеристик, определяемых в дальнейшем), затем полученные значения температур в предполагаемых точках установки термопар использовались для формирования «измеренных» данных и моделировалось решение соответствующей

обратной задачи. В работе анализировалось влияние задаваемых значений начальных приближений определяемых функций, влияние числа параметров аппроксимации на точность получаемого решения, влияние погрешностей задания функций теплового потока и уровня погрешности измерений температур на результаты решения обратной задачи. Полученные результаты моделирования свидетельствуют о достаточно высокой вычислительной устойчивости предлагаемого алгоритма к случайным погрешностям, возникающим при решении коэффициентных обратных задач, а также слабое влияние значений начальных приближений на значение восстанавливаемых характеристик. Это подтверждает возможность получения единственного решения для подобного рода задач.

Важнейшим является вопрос о применимости принципа итерационной регуляризации для многопараметрической конечномерной обратной задачи (конечномерной в результате аппроксимации неизвестных характеристик). Результаты моделирования подтверждают возможность выбора числа параметров аппроксимации, исходя из принципа обобщенной невязки – необходимо выбирать минимальное число параметров аппроксимации, при котором достигается заданное значение уровня невязки (рисунок 1).



1 – число параметров аппроксимации для $C(T)$, $\lambda(T)$ и $\varepsilon(T)$ равно 1 (константы); 2 – число параметров аппроксимации для $C(T)$, $\lambda(T)$ and $\varepsilon(T)$ равно 2 (линейные функции); 3 – число параметров аппроксимации равно 3 для $C(T)$ и $\varepsilon(T)$ и 5 для $\lambda(T)$; 4 – число параметров аппроксимации равно 5 для $C(T)$, $\lambda(T)$ и $\varepsilon(T)$; 5 – число параметров аппроксимации для $C(T)$, $\lambda(T)$ и $\varepsilon(T)$ равно 7

Рисунок 1 – Влияние числа параметров аппроксимации на значения минимизируемого функционала [$K^2 \text{ sec}$] по итерациям

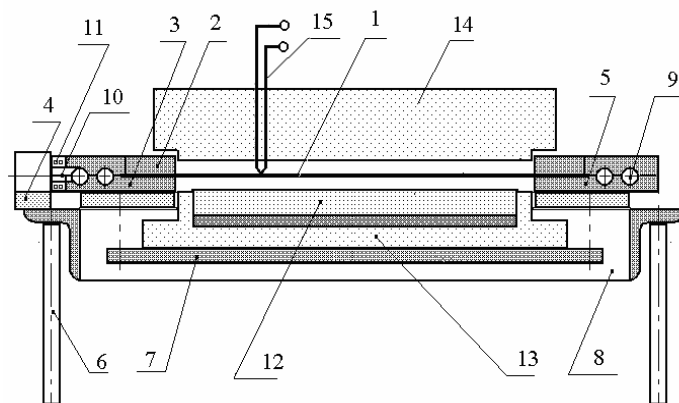
В пятой главе приводятся результаты экспериментально-расчетных исследований теплофизических и радиационных свойств теплозащитного материала, описывается экспериментальная установка, приведены физическая и математическая модели процесса теплопереноса в образце неразрушаемого теплозащитного материала, представлена математическая формулировка коэффициентной обратной задачи с учетом взаимного переизлучения в системе образец - нагреватель; сформулированы требования к образцам, условиям проведения и параметрам испытаний.

Целью исследования является определение теплофизических и радиационных свойств (коэффициента теплопроводности, объемной теплоемкости и интегральной

степени черноты) керамического неразрушаемого теплозащитного материала в температурном диапазоне 300 - 1100 К.

Тепловые испытания образцов материала проводились с использованием специально разработанного и изготовленного экспериментального модуля ЭМ-1 для стенда тепловых испытаний (ТВС) в Тепловой лаборатории кафедры 601 МАИ под руководством В.А. Дорошина.

Экспериментальный образец представляет собой пластину из исследуемого материала с установленными в нем термопарами и размещенного в экспериментальном модуле ЭМ-1 (рисунок 2).



- 1 - нагреватель, 2 - верхняя пластина токовода, 3 - подвижный токовод, 4 - изолятор, 5 - неподвижный токовод, 6 - стойка, 7 - пластина, 8 - рама, 9 - трубка охлаждения, 10 - направляющая, 11- пружина, 12 - образец, 13 - теплоизолирующее основание, 14 - керамическая пластина, 15 - управляющая термопара.

Рисунок 2 – Схема экспериментального модуля

Математическая модель процесса теплообмена в образце материала (неограниченной пластине известной толщины) может быть представлена следующим образом:

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad x \in (X_0, X_1), \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}], \quad (38)$$

$$T(x, \tau_{\min}) = T_0(x), \quad x \in [X_0, X_1], \quad (39)$$

$$T(X_0, \tau) = T_1(\tau), \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}], \quad (40)$$

$$-\lambda(T(X, \tau)) \frac{\partial T(X_1, \tau)}{\partial x} = \varepsilon_{np}(T) \sigma (T_h^4(\tau) - T^4(X_1, \tau)), \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}]. \quad (41)$$

где $\varepsilon_{np}(T) = \frac{\varepsilon(T)\varepsilon_h(T_h)}{\varepsilon(T) + \varepsilon_h(T_h) - \varepsilon(T)\varepsilon_h(T_h)}$

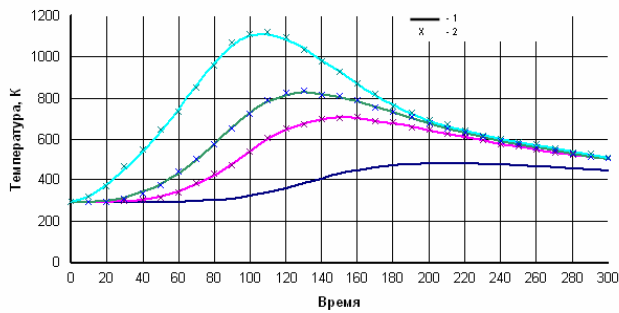
В модели (38) - (41) зависимости $C(T)$, $\lambda(T)$, $\varepsilon(T)$ и $\varepsilon_h(T)$ являются неизвестными. В качестве дополнительной информации, необходимой для решения обратной задачи, заданы результаты измерения температуры

$$T^{\text{exp}}(x_m, \tau) = f_m(\tau), \quad m = \overline{1, M}, M = 3. \quad (42)$$

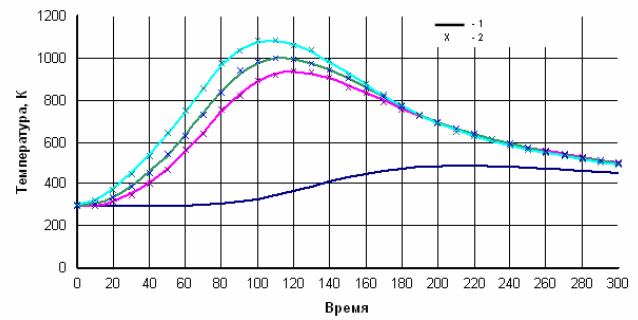
В обратной задаче (38) - (42) прежде всего, необходимо указать область определения искомых функций в виде общего для всех экспериментов интервала температур $[T_{\min}, T_{\max}]$, на котором анализируемая обратная задача имеет единственное решение. В качестве T_{\min} используется минимальное значение начальной

температуры, в качестве T_{\max} выбирается максимальное значение температуры, достигаемое на термопаре, размещаемой около нагреваемой поверхности.

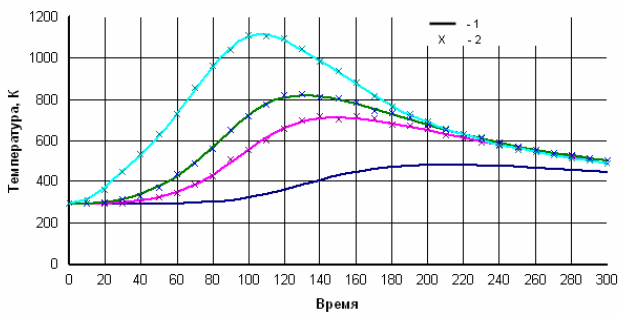
Управление режимом нагрева образца осуществляется по температуре нагревателя в соответствии с заданным режимом.



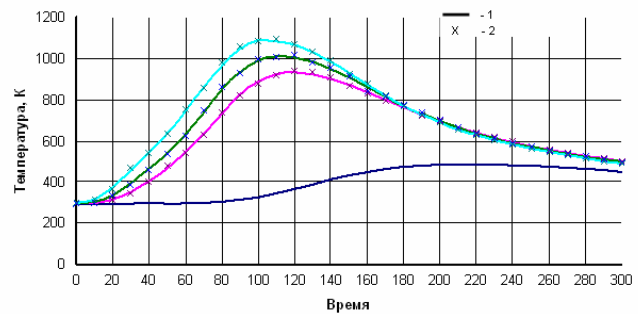
а)



б)



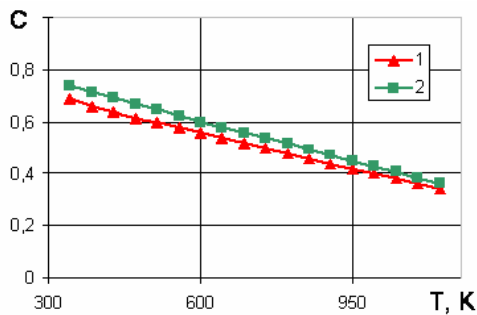
б)



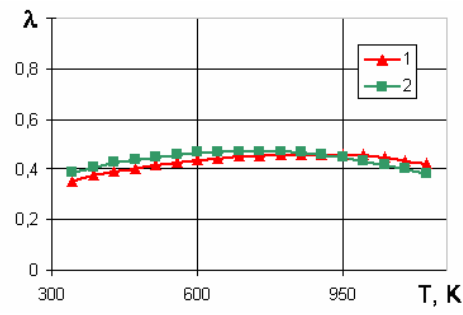
г)

1 – экспериментальные значения, 2 – расчетные значения

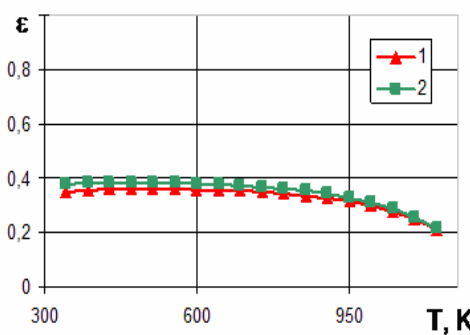
Рисунок 3 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений температур в точках установки термопар в образцах: а) эксперимент 1а, б) эксперимент 2а, в) эксперимент 1б, г) эксперимент 2б



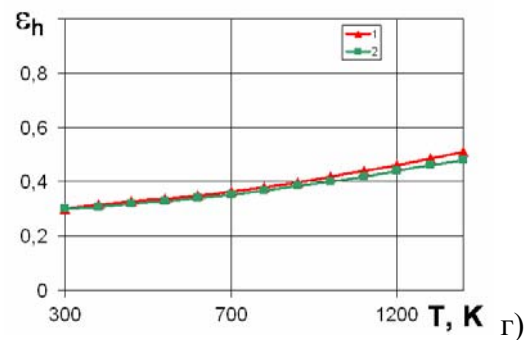
а)



б)



в)



г)

1 – определение характеристик материала (эксперименты 1а, 2а); 2 - определение характеристик материала (эксперименты 1б, 2б)

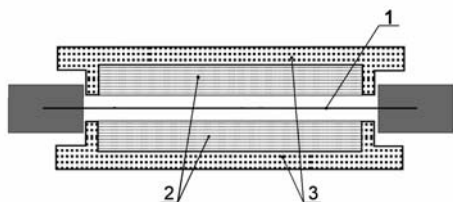
Рисунок 4 – Полученные значения объемной теплоемкости (а), коэффициента теплопроводности (б), интегральной степени черноты материала (в) и интегральной степени черноты нагревателя (г)

Проведенные тепловые испытания позволили решить поставленные задачи по определению комплекса теплофизических и радиационных характеристик.

В шестой главе рассматриваются экспериментально-расчетные исследования теплофизических свойств теплоизоляционного материала без установки внутренних термопар; проведена апробация разрабатываемой методологии при определении теплофизических свойств (коэффициента теплопроводности и объемной теплоемкости) легковесного теплоизоляционного материала. Приведены физическая и математическая модели процесса теплообмена в образце, схема испытаний и методика их проведения.

Тепловые испытания образцов материала проводились с использованием специально разработанного и изготовленного экспериментального модуля ЭМ-2 на тепловакуумном стенде ТВС-1 в Тепловой лаборатории кафедры 601 МАИ под руководством С.А.Будника.

Выбор схемы температурных измерений (схемы размещения термодатчиков в образце) для данных испытаний в значительной степени обусловлен особенностями исследуемого материала. Легковесный теплоизоляционный материал RVC является высокопористым, достаточно хрупким и электропроводным материалом. Все это значительно усложняет надежную установку термодатчиков внутри образца с требуемой точностью, и не позволяет обеспечить требуемую точность измерения температуры при такой установке. С учетом этих особенностей исследуемого материала устанавливать термопары внутри образца нецелесообразно. В качестве граничного условия с обратной поверхности образца использовался датчик теплового потока, а тепловой поток с нагреваемой стороны определялся по электрической мощности нагревателя. Образец представляет собой пластину известной толщины (рисунок 5), теплоизолированную с боковых сторон. В качестве изоляционного материала использовался материал с известными характеристиками (ТЗМК-10).



1 – нагревательный элемент модуля ЭМ-2; 2 – верхний образец (1a / 2a) и нижний образец (1b / 2b); 3 – теплоизоляционный материал (с известными теплофизическими свойствами)

Рисунок 5 – Схема испытаний образцов 1a, 1b материала ETTI-CF-ULT и образцов 2a, 2b материала ETTI-CF-ERG

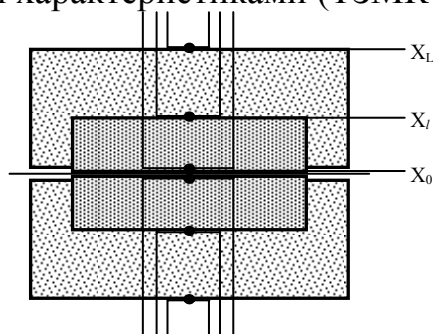


Рисунок 6 – Схема измерений

Математическая модель процесса теплообмена в образце материала может быть представлена следующим образом:

$$C_l(T) \frac{\partial T_l}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_l(T) \frac{\partial T_l}{\partial x} \right) \quad (45)$$

$$X_{l-1} < x < X_l, l = \overline{1,2}, X_0 = 0,$$

$$0 \leq \tau \leq \tau_{\max}$$

$$T_l(x, 0) = T_l^0(x), X_{l-1} < x < X_l, l = \overline{1,2} \quad (46)$$

$$T_1(X_0, \tau) = T_1^{\text{exp}}(\tau) \quad (47)$$

$$\lambda_1(T_1(X_1, \tau)) \frac{\partial T_1(X_1, \tau)}{\partial x} = \lambda_2(T_2(X_1, \tau)) \frac{\partial T_2(X_1, \tau)}{\partial x}, \quad (48)$$

$$T_1(X_1, \tau) = T_2(X_1, \tau), \quad (49)$$

$$-\lambda_2(T_2(X_2, \tau)) \frac{\partial T_2(X_2, \tau)}{\partial x} = q_2(\tau). \quad (50)$$

В модели (45) - (50) зависимости $\lambda_2(T)$ и $C_2(T)$ являются неизвестными. В качестве дополнительной информации, необходимой для решения обратной задачи, заданы результаты измерения температуры (рисунок 7). Плотность теплового потока на нагреваемых поверхностях образцов $q_2(\tau)$, $0 \leq \tau \leq \tau_{\max}$ может быть определена по электрической мощности $W(\tau)$ нагревательного элемента с учетом потери тепла за счет теплоемкости нагревательного элемента. На внутренних поверхностях образцов плотности теплового потока определяются из решения граничной обратной задачи для теплоизолирующей подложки, выполненной из материала с известными свойствами.

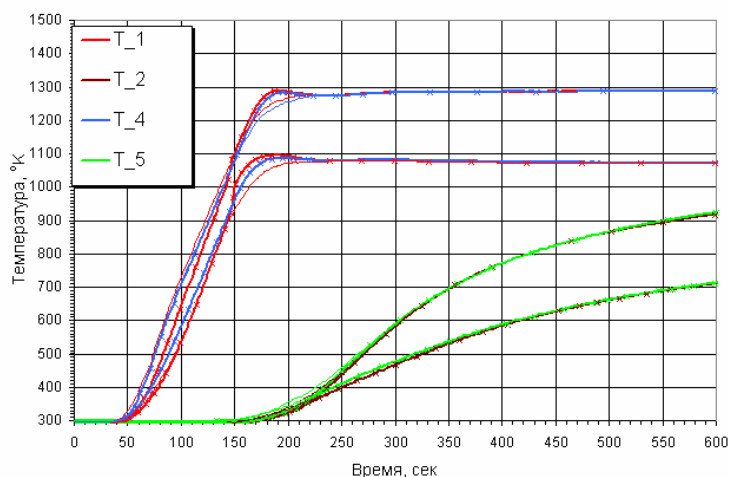


Рисунок 7 – Сравнение расчетных и измеренных значений температур для материала ETTI-CF-ULT (эксперимент №1(1070) и №2 (1270))

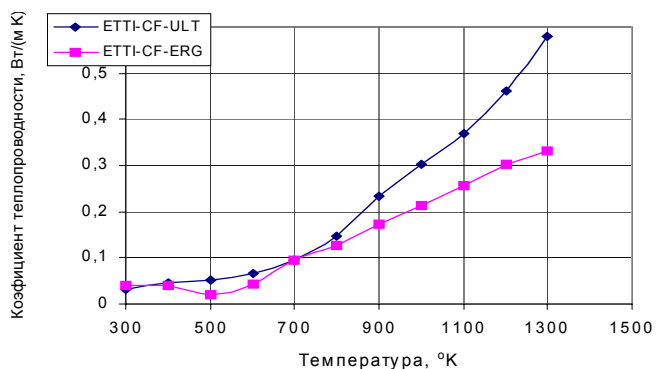


Рисунок 8 – Полученное значение коэффициента теплопроводности для материалов ETTI-CF-ERG и ETTI-CF-ULT

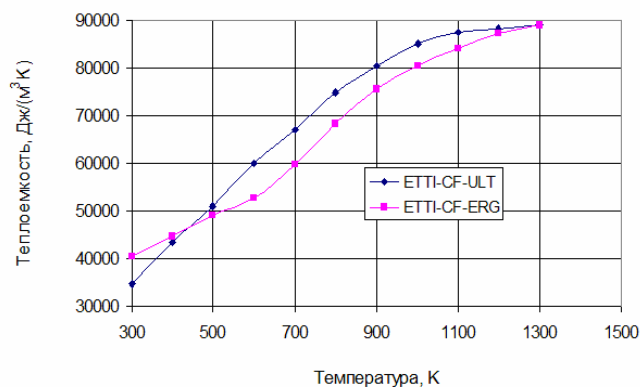


Рисунок 9 – Полученное значение коэффициента объемной теплоемкости для материалов ETTI-CF-ERG и ETTI-CF-ULT

Проведенные тепловые испытания позволили решить поставленные задачи по определению характеристик теплового состояния образцов легковесного теплоизоляционного материала типа ETTI-CF-ULT и типа ETTI-CF-ERG в целях определения комплекса их теплофизических характеристик.

Расхождения расчетных значений температур (полученных с использованием определенных характеристик материалов) и экспериментально измеренных оказались достаточно малыми, что подтверждает достаточную точность оценок характеристик исследуемых материалов.

В заключении приведены выводы по представляемой работе.

К основным научным положениям и выводам, которые сформулированы и доказаны в диссертации и позволили решить поставленные в работе задачи, следует отнести следующие:

1. На основе общего подхода к решению обратных задач математической физики был разработан алгоритм решения задач идентификации математических моделей теплообмена в многослойных элементах конструкции из неразрушаемых материалов методом итерационной регуляризации с использованием предварительной параметризации определяемых характеристик, с представлением искомым функций в виде В-сплайнов, с учетом априорной информации об определяемых характеристиках, с вычислением векторного параметра спуска при решении обратных задач по определению нескольких характеристик.

2. Проведен анализ существующих вычислительных алгоритмов при численной реализации итерационных методов решения обратных задач и разработан вычислительный алгоритм для численного решения задач идентификации для многослойной конструкции теплозащитного покрытия в одномерной постановке. Впервые была получена однородная разностная схема для многослойной конструкции, в том числе для случая неидеальных контактов между слоями. Разработаны принципы программной реализации разработанного вычислительного алгоритма.

3. Проведен анализ свойств вычислительных алгоритмов путем математического моделирования и сделаны выводы о влиянии различных факторов на точность решения обратной задачи.

4. Были проведены экспериментально-расчетные исследования теплофизических и радиационных свойств (коэффициента теплопроводности, объемной теплоемкости, интегральной степени черноты) теплозащитного материала и интегральной степени черноты нагревателя с учетом их взаимного влияния. Построены физическая и математическая модели процесса теплообмена в образце, разработана математическая формулировка коэффициентной обратной задачи. На основе экспериментальных данных были определены искомые зависимости $C(T)$, $\lambda(T)$, $\varepsilon(T)$, $\varepsilon_h(T)$.

5. Были проведены экспериментально-расчетные исследования теплофизических свойств (коэффициента теплопроводности и объемной теплоемкости) теплоизоляционного материала на основе вспененного углерода RVC без установки внутренних термодпар. Построены физическая и математическая модели процесса теплообмена в образце, разработана математическая формулировка коэффициентной обратной задачи.

В Приложении приведены принципы построения программного обеспечения.

Список публикаций.

1. Алифанов О.М., Ненарокомов А.В., Титов Д.М. и др. Автоматизированная система научных измерений для исследования перспективных теплотехнических материалов методами обратных задач теплообмена // Современные наукоемкие технологии. 2005. №5. С. 67-68.
2. Алифанов О.М., Ненарокомов А.В., Титов Д.М. Исследование радиационного и кондуктивного теплопереноса методом обратных задач // Сб. трудов V Минского международного форума по тепло- и массообмену (24-28 мая 2004г.). - Минск: ИТМО, 2004. - Том I. С. 266-267.
3. Алифанов О.М., Ненарокомов А.В., Титов Д.М. и др. Определение теплофизических свойств легковесного теплоизоляционного материала на основе вспененного углерода методом обратных задач // Материалы XI Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ (7-9 октября 2005 г.).- Санкт-Петербург: Изд-во СПГУНПТ. 2005. - Т.2. С. 124-130.
4. Алифанов О.М., Ненарокомов А.В., Титов Д.М. и др. Оптимальное планирование эксперимента при изучении термодеструкции материала // Сб. трудов VI Минского международного форума по тепломассообмену (19 – 23 мая 2008, Минск, Беларусь).- Минск, ИТМО. 2008. - С. 278-280.
5. Алифанов О.М., Ненарокомов А.В., Титов Д.М. и др. Экспериментально-вычислительный комплекс для исследования теплофизических свойств теплотехнических материалов методами обратных задач // Сб. трудов V Международной конференции проблемы промышленной теплотехники (22–26 мая 2007 г. Киев, Украина). – Изд. ИТТФ, Киев, 2007. - С. 112-113.
6. Ненарокомов А.В., Титов Д.М., Гонсалес В.М. Автоматическое проектирование неразрушаемой тепловой защиты космических аппаратов // Вестник МАИ. 2010. Т.16. №4. С. 60-67.
7. Alifanov O.M., Ischuk A.A., Nenarokomov A.V., Titov D.M. и др. An experimental-computational system for the determination of thermal properties of materials. II. Conception and realization of computer code for experimental data processing // Сб. трудов Inverse Problems: Theory and Practice: 5-я международная конференция (11-15 июля 2005 г., Кембридж, Великобритания). - Leeds University Press, Leeds, UK, 2005. - Vol.III. PP.N04.1-N04.10.
8. Alifanov O.M., O.M., Nenarokomov A.V., Titov D.M. и др. A study of the aerospace systems thermal statements // Сб. трудов Recent Research and Design Progress in Aeronautical Engineering and its Influence on Education Proceedings: 6-й международный семинар (14-16 октября 2004 г., Рига, Латвия).- RTU Aviation Institute, 2004. - PP. 10-11.
9. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Titov D.M. и др. A study of spacecraft structures materials thermal properties based on inverse problems technique // Сб. трудов 5th European Workshop on Thermal Protection Systems and Hot Structures (Noordwijk, the Netherlands, 17-19 May 2006. (ESA SP-631)).- Noordwijk: ESTEC Publ., 2006. 8 p.
10. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Titov D.M. и др. An Experimental-Computational System For Materials Thermal Properties Determination And Its Application For Spacecraft Structures Testing // Сб. трудов 57th International

- Astronautical Congress (2-6 October 2006, Valencia, Spain).- Valencia, Spain: IAC-06-C2I.7.09, 2006, 10p.
11. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Titov D.M. и др. An Experimental-Computational System for Materials Thermal Properties Determination and its Application for Spacecraft Structures Testing // *Acta Astronautica*. 2007. Vol.61. PP.341-351.
 12. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Titov D.M. Space Structures Insulating Material's Thermophysical and Radiation Properties Estimation // *Acta Astronautica*. 2007. Vol.61. PP.873-880.
 13. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Titov D.M. и др. Destructive Materials Thermal properties determination with application for spacecraft structures testing // *Сб. трудов 61th International Astronautical Congress (27 September -1 October, Prague, Czech Republic)*.- Prague: IAC-10-C2.7.5, 2010, 10 p.
 14. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Titov D.M. Estimating of Material's Thermal and Radiative Properties. In *Proceedings of 7th International Conference on Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice (May 4 – 6, 2011, Orlando, Florida, USA)*.- Int. University of Florida Publ., 2011, 6p.
 15. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Titov D.M. и др. Inverse Problems Technique to Estimate the Thermal Properties of Spacecraft Materials // *Сб. трудов ISTC Thematic Workshop on Perspective materials, devices and structures for space application (May 26 - 28 2009, Yerevan, Armenia)*.- Yerevan: 2009, 10p.
 16. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Titov D.M. и др. Mathematical and experimental simulation in thermo-loaded aerospace structures design and testing // *Сб. трудов Seventh International Seminar on Recent Research and Design Progress in Aeronautical Engineering and its Influence on Education (11-12 October, 2006, Tallinn, Estonia)*.- Tartu: TAC. 2006. PP. 60-61.
 17. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Titov D.M. Material's thermophysical and radiative properties estimating // *Сб. трудов Int. Conference on Materials Characterization and Inverse Problems (April 25-27, 2009 Sousse, Tunisia)*.- Sousse: Newtechenergy Publ., Tunisia, 2009, 6 pp.
 18. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Titov D.M. и др. Method for Estimating Parameters of Coupled Problem of Interaction of Gas Flows Loaded by Solid Particles with Solids // *Сб. трудов Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering: 4-я международная конференция (20-22 июня 2011 г., Кос, Греция)*.- Barselona, CIMNE Publ., 2011, 12p.
 19. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Titov D.M. и др. Method for estimating parameters of gas flows loaded by solid particles interacted with solids // *Сб. трудов Int. Symp. on Convective Heat and Mass Transfer in Sustainable Energy (April 26 – May 1, 2009, Tunisia)*.- Begell House Inc., Redding, USA, 2009, 16 p.
 20. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Titov D.M. и др. Optimal experiment design to estimate the thermal destruction parameters of materials // *Сб. трудов Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice: 6-я международная конференция (16-19 июня 2008 г., Дурдан, Франция)*.- Univ. Nancy Publ., 2008. PP. 85.1-85.5.
 21. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Titov D.M. Space structures insulating material's thermophysical and radiation properties estimation. // *Сб. трудов. 55th International Astronautical Congress (4-8 October 2004, Vancouver, Canada)*.- Vancouver: IAC-04-IAF-I.6.09, 2004, 10 p.

22. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Titov D.M. Study of Radiative and Conductive Heat Transfer by Inverse Problems Methods // Heat Transfer Research. 2006. Vol.36. No.3. PP.189-198.
23. Nenarokomov A.V., Titov D.M. Estimating properties of materials interacted with high-enthalpy gas flow by inverse problems technique // Сб. трудов 6th European Workshop on Thermal Protection Systems and Hot Structures (March 31 – April 3, 2009, Stuttgart, Germany). –Stuttgart: ESA/ESTEC Publ. Division. # 1546751, 2009, 12p.
24. Nenarokomov A.V., Titov D.M. Evaluation of thermophysical properties for materials interacted with gas flows // Сб. трудов Int.Conference on Materials Characterization and Inverse Problems (April 25-27, 2009 Sousse, Tunisia).- Sousse: Newtechenergy Publ., Tunisia, 2009, 6p.
25. Nenarokomov A.V., Titov D.M. Study of perspective materials interacted with high-enthalpy gas flow by inverse problems technique // Сб. трудов Inverse Problems: Identification, Design and Control: 6-я международная конференция (6-11 октября 2010 г., Самара, Россия).- Москва: Издательство МАИ, 2010, 9p.
26. Nenarokomov A.V., Titov D.M. Optimal experiment design to estimate the radiative properties of materials // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2005. Vol.93. PP.313-323.
27. Nenarokomov A.V., Titov D.M., Gonsales V.M. Parameter estimation of mathematical model of heat transfer at multilayer thermal insulation// Сб. трудов Inverse Problems: Identification, Design and Control: 6-я международная конференция (6-11 октября 2010 г., Самара, Россия).- Москва: Издательство МАИ, 2010, 10p.
28. Nenarokomov A.V., Titov D.M. Optimal experiment design to estimate the radiative properties of materials / M.P.Menguc, N.Selcuk ed // Сб. трудов Fourth International Symposium on Radiative Transfer. - New York, Wallingford (UK): Begell House, 2004.- P.357-364.