

На правах рукописи



Крайнова Ирина Валерьевна

**РАЗРАБОТКА И ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ЭКРАНО-ВАКУУМНОЙ
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Ненарокомов Алексей Владимирович

Официальные оппоненты: **Просунцов Павел Викторович**
доктор технических наук, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, профессор кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции»

Юдин Валерий Михайлович
кандидат технических наук, ГНЦ ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», ведущий научный сотрудник НИО-3

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно - производственное объединение им. С.А. Лавочкина"

Защита состоится «21» декабря 2015г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ), по адресу: 125993 Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамске шоссе, д.4.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Для космических аппаратов обеспечение тепловых режимов было и остается одной из самых важных задач, определяющих основные проектно-конструкторские решения. Общая тенденция развития космической техники связана с ужесточением условий теплового нагружения различных систем, с необходимостью повышать их надежность и ресурс и одновременно снижать энерго- и материалоемкость. Для таких технических систем обеспечение тепловых режимов, основанное на применении теплоизоляции с соответствующими свойствами, является одним из важнейших этапов проектирования. В настоящее время создание таких конструкций связано с широким применением методов физического и математического моделирования.

Использование средств математического моделирования позволяет предсказывать свойства материалов уже на стадии их проектирования и разработки. Для получения как можно более точных результатов моделирования необходимо обладать достоверной информацией о характеристиках анализируемых объектов. Однако в большинстве случаев прямое измерение теплофизических и радиционно-оптических свойств конструкций (особенно сложного состава) является невозможным. В этом случае единственным путем, позволяющим определять необходимые характеристики, является не прямое измерение. Математически подобный подход обычно представляет собой решение обратной задачи: по прямым измерениям состояния системы (например, температуры) определяются свойства анализируемой системы.

Используемые в настоящее время в инженерных расчетах математические модели теплопереноса в экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) описывают совокупность изотермических элементов, соответствующих металлическим (металлизируемым) экранам, и не учитывают влияния волокнистых разделительных слоев, расположенных между экранами, на перенос тепла в ЭВТИ. В известной литературе этот вопрос не рассматривается. В то же время, в связи с повышением требований к точности расчета тепловых изоляций космических аппаратов, возникает необходимость учитывать все значимые факторы.

Последнее обстоятельство послужило основанием для данной работы, в которой специальное внимание уделено влиянию радиационных характеристик волокнистых разделителей на перенос тепла излучением. В расчетной модели учитывается также роль возможного тонкого оксидного слоя на поверхности металлических экранов. В работе также разработан алгоритм решения обратной задачи теплообмена, позволяющий определять теплофизические характеристики ЭВТИ с высокой точностью.

Изложенное выше делает задачу разработки и идентификации уточненной математической модели теплопереноса в экрано-вакуумной теплоизоляции космических аппаратов актуальной.

Цель работы

Данная работа посвящена вопросам повышения точности математического моделирования теплопереноса в экрано-вакуумной теплоизоляции космических аппаратов. В предложенной модели учитываются влияние волокнистых разделителей между экранами, а также тонкого оксидного слоя на поверхности экранов на величину интегрального потока теплового излучения через ЭВТИ. Также в работе представлен алгоритм параметрической идентификации предложенной математической модели.

Задачи работы

1. Разработка уточненной математической модели теплопереноса в экрано-вакуумной теплоизоляции, учитывающей наличие разделительных слоев из полупрозрачного волокнистого материала между экранами.
2. Исследование эффективности разработанной модели путем сравнения результатов математического моделирования при использовании модифицированной математической модели с экспериментальными данными.
3. Разработка математической модели внешнего теплового воздействия на космический аппарат во время орбитального полета.
4. Разработка алгоритма идентификации математической модели теплопереноса в системах с сосредоточенными параметрами.
5. Практическая апробация алгоритма идентификации на примере определения некоторых радиационных характеристик ЭВТИ по результатам тепловых испытаний.

Методы исследования

Работа, направленная на достижение сформулированных выше задач, предполагает проведение большого объема расчетных исследований, построение вычислительных алгоритмов, связанных, прежде всего, с разработкой алгоритмов и математического обеспечения для решения обратных задач теплообмена в условиях реального теплофизического эксперимента. Для создания таких алгоритмов использован обширный опыт в решении обратных задач для систем с распределенными параметрами, распространенный на разработанную математическую модель. Большинство разработанных алгоритмов реализовано на базе уже имеющегося программного обеспечения, написанного на языке FORTRAN, которое было существенно модифицировано с учетом поставленных целей. Также для отдельных задач было разработано новое программное обеспечение.

Научная новизна

Разработана уточненная математическая модель теплообмена в ЭВТИ, впервые учитывающая радиационный перенос внутри разделительных слоев, выполненных из волокнистых высокопористых полупрозрачных материалов

(волокон), а также наличие тонкого оксидного слоя на металлических экранах. Разработан алгоритм решения обратной задачи теплообмена по восстановлению зависящих от температуры теплофизических и спектральных радиационных характеристик ЭВТИ, в том числе и для волокнистых разделительных слоев между экранами ЭВТИ.

Теоретическая и практическая ценность работы

Важнейшим теоретическим результатом работы является математическая модель теплопереноса в разделительных слоях ЭВТИ. Практическая ценность данной работы состоит в разработке прикладного алгоритмического и программного обеспечения, которое может быть использовано для определения радиационно-оптических характеристик ЭВТИ. Также разработан программный комплекс, позволяющий определять поток теплового излучения, воздействующий на элемент конструкции космического аппарата во время орбитального полета, на основе данных, известных из программы полета КА.

Достоверность и обоснованность работы подтверждаются сравнением результатов численного моделирования с использованием разработанных алгоритмов и экспериментальных исследований образцов ЭВТИ.

Апробация работы и публикации

Основные научные результаты работы докладывались на научно-технических конференциях. В частности, на V Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос» (Санкт-Петербург, Россия, 20-22 марта 2013г.), на конференции «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Орехово-Зуево, Россия, 19-23 мая 2013г.), на 7-ом международном симпозиуме по радиационному теплообмену (7th International ICHMT Symposium on Radiative Transfer RAD-13, Кушадасы, Турция, 2-8 июня 2013г.), на 8-ой международной конференции по обратным задачам (8th International Conference on Inverse Problems in Engineering ICIPe-2014, Польша, Краков, 12-15 мая 2014), на 15-ой международной конференции по теплообмену (15th International Heat Transfer Conference IHTC-15, Киото, Япония, 10-15 августа 2014г.).

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в ряде научно-технических отчетов, 7 публикациях в научных изданиях, из них 2 научные работы опубликованы в изданиях, рекомендуемых Перечнем ВАК при Министерстве образования и науки РФ, и 1 работа опубликована в издании, цитируемом в базе данных Scopus.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы; содержит 148 страниц основного текста, 62 рисунка, 6 таблиц, список литературы из 58 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, поставлены задачи и цель работы. Доказана достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы. Кратко охарактеризованы методы теоретического и экспериментального исследования, а так же доказана научная ценность и значимость работы.

В первой главе диссертационной работы приведено краткое описание различных реализаций экрано-вакуумной тепловой изоляции (ЭВТИ) как эффективного пассивного средства терморегулирования КА. Сформулированы основная постановка задачи исследования.

Также в данной главе описывается разработанный и реализованный на языке FORTRAN алгоритм, позволяющий определять потоки теплового излучения, действующие на элемент конструкции, произвольно расположенный на поверхности космического аппарата, на основе данных, известных из программы полета КА (текущей даты, параметров орбиты КА, ориентации КА во время орбитального полета, положение исследуемой поверхности на аппарате).

Определяется ориентация исследуемого элемента поверхности КА в инерциальной системе координат, что позволяет вычислять в общем случае углы и угловые коэффициенты, необходимые для определения величин тепловых потоков. Поток солнечного излучения, отраженное от планеты солнечное излучение и собственное излучение планеты определяются по известным аналитическим выражениям.

Данная методика использована для расчета потоков теплового излучения, воздействующих на элемент поверхности космического аппарата, находящегося на орбите планет каждого из трех типов. Показано влияние различных параметров, а именно, эллиптичности орбиты планеты, эллиптичности орбиты КА, наклона орбиты КА, долготы восходящего узла и положения перицентра эллиптической орбиты КА, на плотности потоков теплового излучения.

Во второй главе представлена разработка уточненной математической модели теплопереноса в ЭВТИ, при этом специальное внимание уделено влиянию радиационных характеристик волокнистых прокладок на перенос тепла излучением. Также приводится традиционная модель теплопереноса в ЭВТИ, не учитывающая радиационный теплоперенос в волокнистых разделительных слоях между экранами ЭВТИ.

Сначала рассмотрен элемент ЭВТИ, состоящий из двух экранов, между которыми располагается разделительный слой из полупрозрачного волокнистого материала (рис. 1).

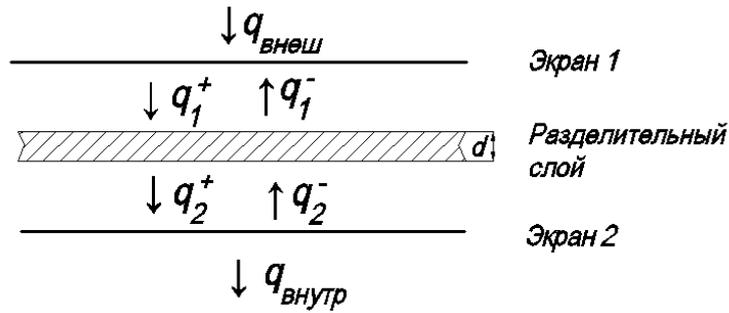


Рис. 1. Схема рассматриваемой задачи.

На основании некоторых принятых допущений из уравнения баланса спектральных потоков излучения в зазорах между слоями фольги и разделителя получено выражение для спектрального потока излучения через слой ЭВТИ:

$$q_\lambda = \frac{f_{1,\lambda} - f_{2,\lambda}}{\frac{1}{\varepsilon_{1,\lambda}} + \frac{1}{\varepsilon_{2,\lambda}} + \frac{2}{1+T_\lambda - R_\lambda} - 2} \quad (1)$$

Здесь $\varepsilon_{1,\lambda}, \varepsilon_{2,\lambda}$ – спектральные полусферические излучательные способности экранов при температурах T_1 и T_2 , $f_\lambda = \pi B_\lambda(T)$ – спектральный поток излучения абсолютно черного тела с температурой T , $B_\lambda(T)$ – функция Планка, R_λ и T_λ – спектральные полусферические отражательная и пропускательная способности разделителя.

Отражательная и пропускательная способности высокопористого волокнистого разделителя определяются на основании теории независимости рассеяния и теории Ми для бесконечного однородного цилиндра и данных об ориентации волокон и дисперсном составе волокнистого материала. Получено соотношение для величины $U_\lambda = T_\lambda - R_\lambda$:

$$U_\lambda = 1 - A_\lambda - 2R_\lambda = 1 - \frac{4}{\pi}(1-p)\tilde{Q}_r \quad (2)$$

В расчетной модели учтено также возможное наличие тонкого оксидного слоя на поверхности металлических экранов.

Результаты расчетов показали, что толщина оксидной пленки на поверхности металлических экранов оказывается значительным фактором уже на уровне 0.1 мкм (рис. 2).

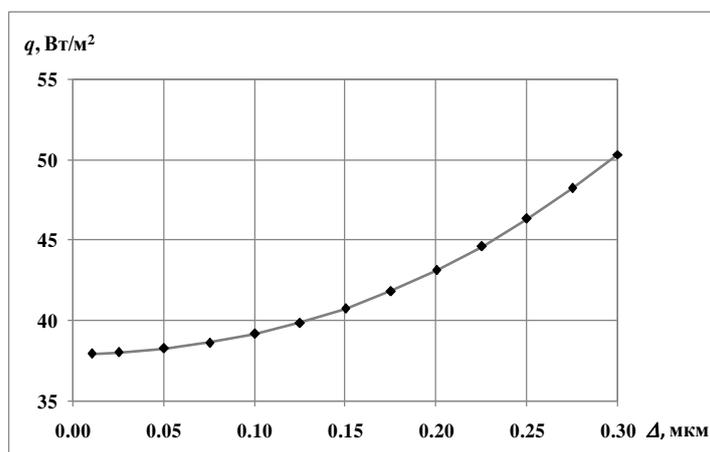


Рис. 2. Интегральный поток теплового излучения через ЭВТИ в зависимости от толщины оксидной пленки.

Результаты расчетов интегрального потока теплового излучения через слой ЭВТИ в зависимости от поверхностной пористости волокнистого материала и от радиуса волокна приведены на рис. 3.

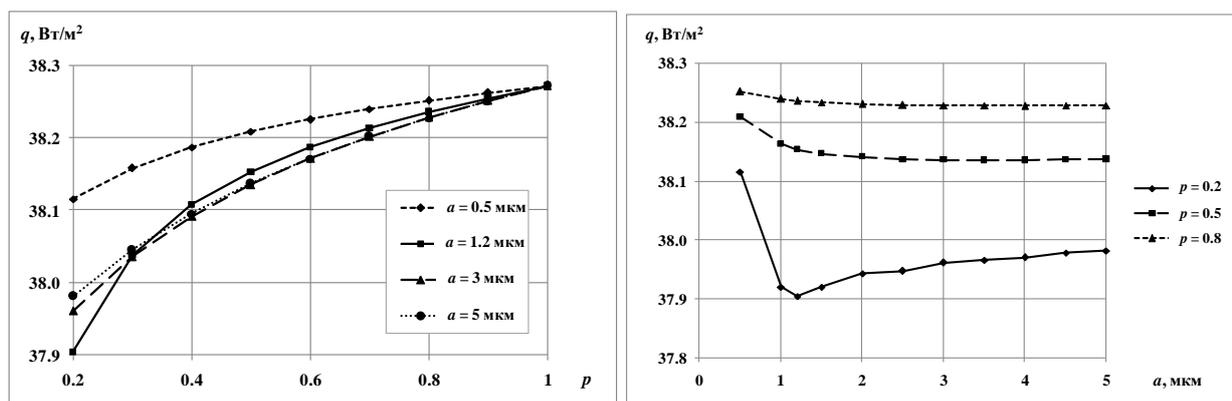


Рис. 3. Интегральный поток теплового излучения через слой ЭВТИ в зависимости: а) от поверхностной пористости волокнистого материала; б) от радиуса волокна.

Видно, что использование более плотного разделителя приводит к небольшому снижению интегрального потока теплового излучения через слой ЭВТИ. При этом пористость оказывается более значительным фактором для сравнительно толстых волокон. Видно, что в случае наиболее плотного разделителя наблюдается отчетливо выраженный минимум интегрального потока излучения при радиусе волокон $a = 1.2$ мкм. Этот минимум объясняется максимальным ослаблением теплового излучения волокнами данного радиуса.

Анализ возможных решений для волокнистых разделителей показал, что хорошим решением для уменьшения теплового потока без увеличения веса ЭВТИ является использование не простых кварцевых волокон, а таких же или более тонких волокон, покрытых тончайшим слоем алюминия, толщиной около 20-30 нм. Такие волокна характеризуются чрезвычайно высоким ослаблением инфракрасного излучения.

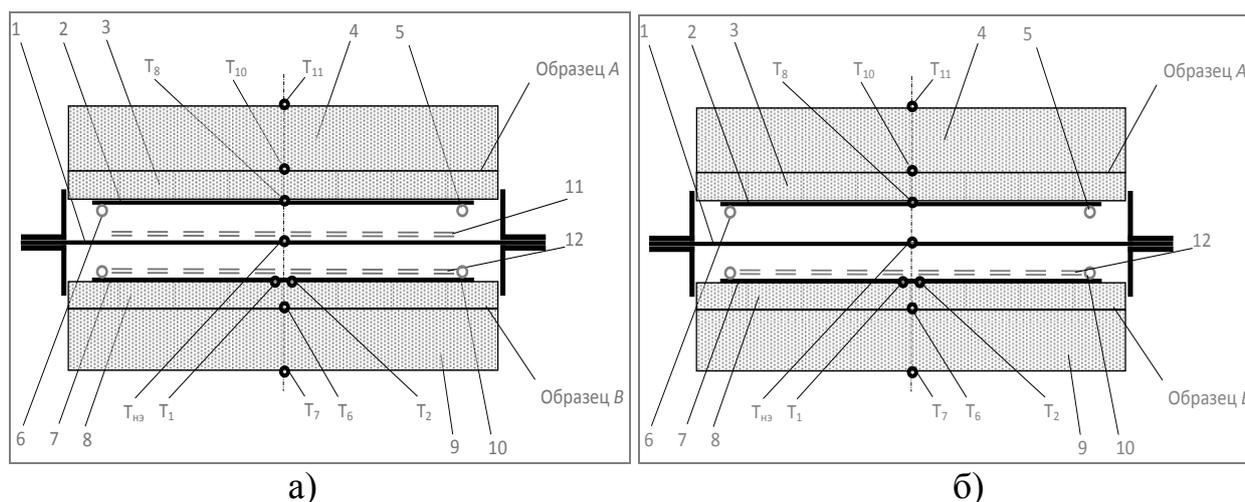
В случае металлизированных волокон для плотного разделителя оказываются значительными эффекты зависящего рассеяния. Показано, что при такой оценке тепловой поток через ЭВТИ может быть снижен в два раза:

$$\frac{q_{\lambda}^{sp}}{q_{\lambda}} = \frac{\frac{1}{\varepsilon_{1,\lambda}} + \frac{1}{\varepsilon_{2,\lambda}} - 1}{\frac{1}{\varepsilon_{1,\lambda}} + \frac{1}{\varepsilon_{2,\lambda}} + \frac{2}{\varepsilon_{sp,\lambda}} - 2} = 0.5 \quad (3)$$

В третьей главе представлен анализ результатов экспериментальных исследований.

Основными целями первого экспериментального исследования образцов являлось: определение, с использованием термодатчиков, характеристик теплового состояния модельных образцов ЭВТИ с различным расположением сепарирующих слоев относительно радиационных экранов и характеристик теплового состояния датчиков теплового потока (ДТП), установленных на образцах в условиях нестационарного радиационного нагрева в вакууме, в диапазоне температур от комнатной до 400К.

Для проведения испытаний были разработаны и изготовлены два экспериментальных образца А и В, моделирующие элементы ЭВТИ (радиационный экран + сепарирующий слой). Каждый из образцов А и В состоит из двух экранов, представляющих собой алюминиевую фольгу. Между ними в общем случае располагаются разделительные слои из кварцевого холста. При этом один из экранов является общим для двух образцов и выполняет функцию нагревательного элемента. На обратных поверхностях ЭВТИ расположены датчики тепловых потоков и теплоизолирующие пластины. Испытания проводились в несколько этапов для различных схем, отличающихся расположением разделителей на экранах (рис. 4).



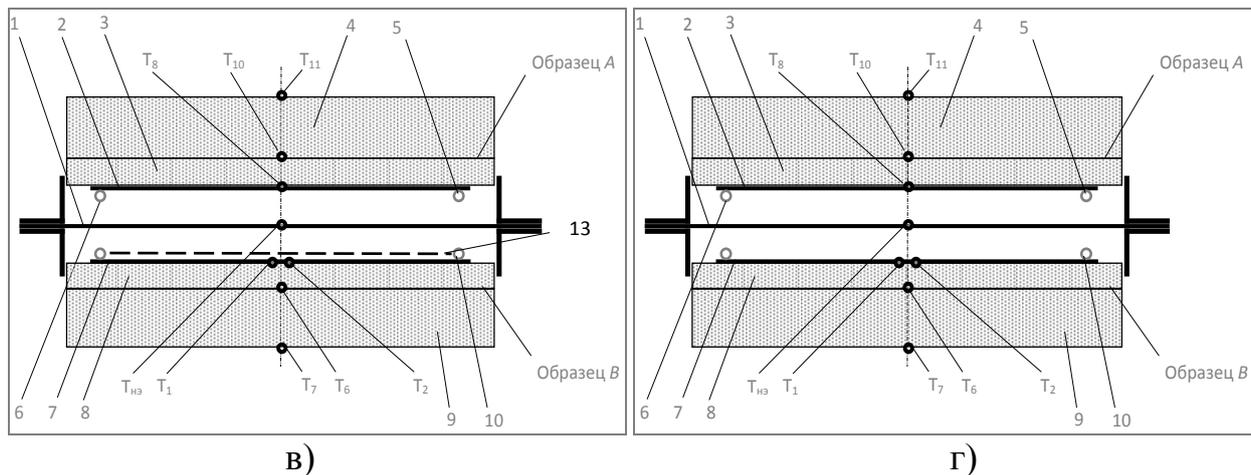
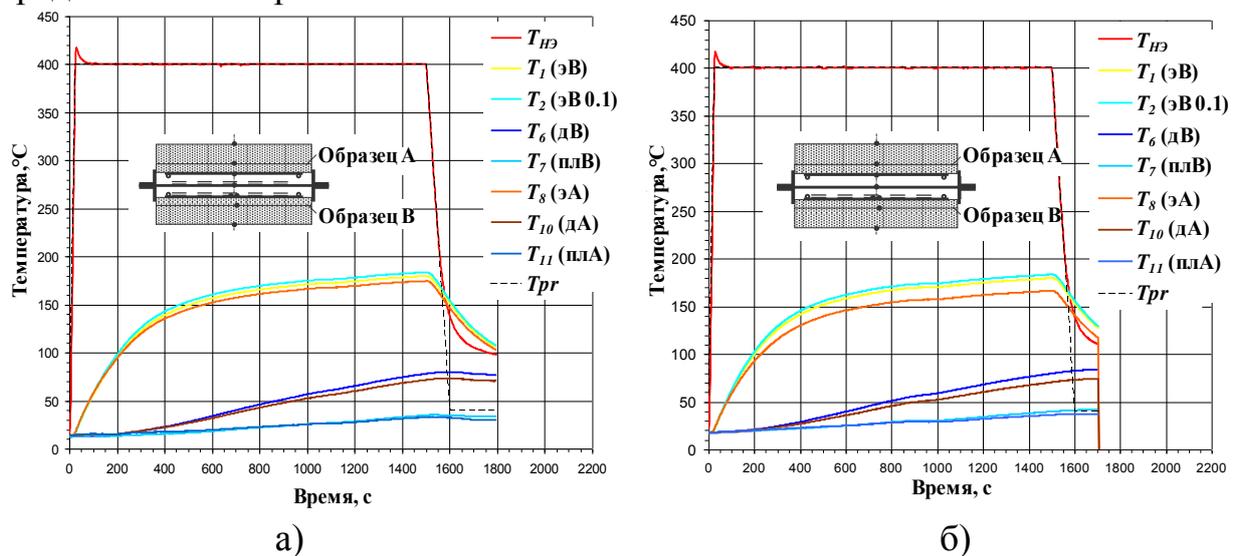
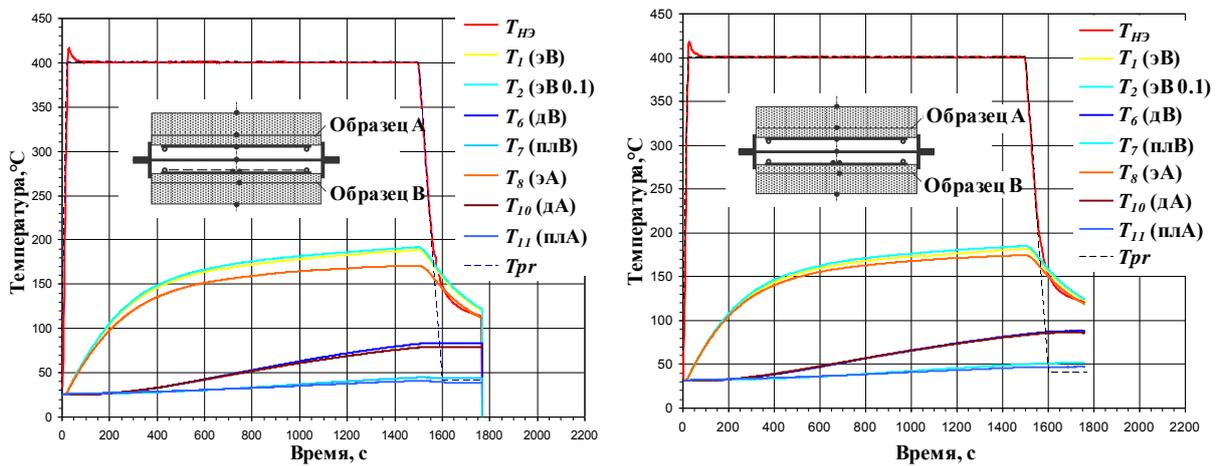


Рис. 4. Схемы тепловых испытаний: 1 – нагревательный элемент (НЭ), 2 – экран образца А, 3 – датчик теплового потока образца А (ДТП_А), 4 – теплоизолирующая пластина на образце А, 5 и 6 – опоры экрана образца А, 7 – экран образца В, 8 – датчик теплового потока образца В (ДТП_В), 9 – теплоизолирующая пластина на образце В, 10 – элемент крепления экрана образца В, 11 – 2-хслойный сепаратор на НЭ, 12 – 2-хслойный сепаратор на экране образца В, 13 – 1-слойный сепаратор на экране образца В.

Для каждой из приведенных схем испытаний проводилось два испытания на режимах нагрева с темпом $2K/c$ и $15K/c$, с целью оценки влияния темпа нагрева на процессы теплообмена. В качестве термодатчиков использовались термопары типа Хромель-Алюмель с диаметрами проводов $\varnothing 0,05mm$ и $\varnothing 0,1mm$.

Результаты испытаний для различных схем для темпа нагрева $15K/c$ представлены на рис. 5.





в) г)
Рис. 5. Результаты испытания для различных схем.

Влияние рассмотренных темпов нагрева 15К/с и 2К/с на результаты испытаний заключается, в основном, в увеличении скорости нагрева образцов. В связи с этим в дальнейших расчетах используются результаты, полученные на режиме нагрева с темпом 2К/с.

Различие в показаниях термопар разных диаметров является достаточно малым, что может быть связано с погрешностями в схеме испытаний, в частности, различным контактным сопротивлением в местах установки термопар. Поэтому в дальнейших расчетах используются показания термопары $\varnothing 0,05$ мм.

Для оценки результатов экспериментального исследования образцов проводится сравнение расчетных значений плотностей тепловых потоков на границе пассивного экрана. На рис. 6 приведена схема проведения такого расчета.

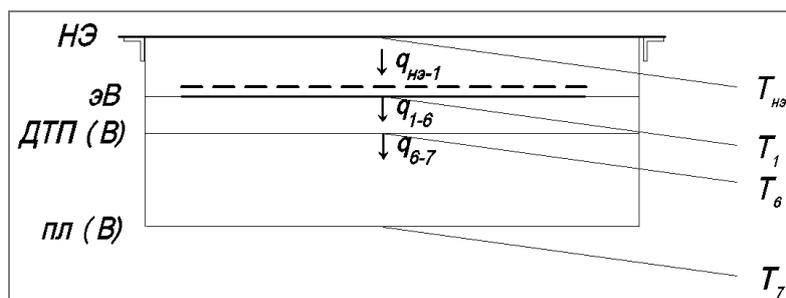


Рис. 6. Схема расчетов плотностей тепловых потоков.

На данной схеме $q_{НЭ-1}$ – поток теплового излучения между двумя экранами ЭВТИ, вычисленный по предлагаемой методике и учитывающий наличие разделительного слоя между экранами. А q_{1-6} – поток теплового излучения на внутренней границе ДТП. При этом сначала на основании температур T_6 и T_7 вычисляется плотность теплового потока q_{6-7} на границе датчика теплового потока и теплоизолирующей пластины с помощью решения граничной обратной задачи теплообмена. А затем на основании

полученного теплового потока q_{6-7} и экспериментальных значений температуры T_6 с помощью решения граничной ОЗТ определяется тепловой поток q_{1-6} .

На рис. 7 приведено сравнение расчетных значений плотностей теплового потока для экранов А и В для различных схем измерений. Здесь сплошной линией изображен тепловой поток между экранами ЭВТИ, а штриховой линией – тепловой поток на границе экрана с датчиком теплового потока.

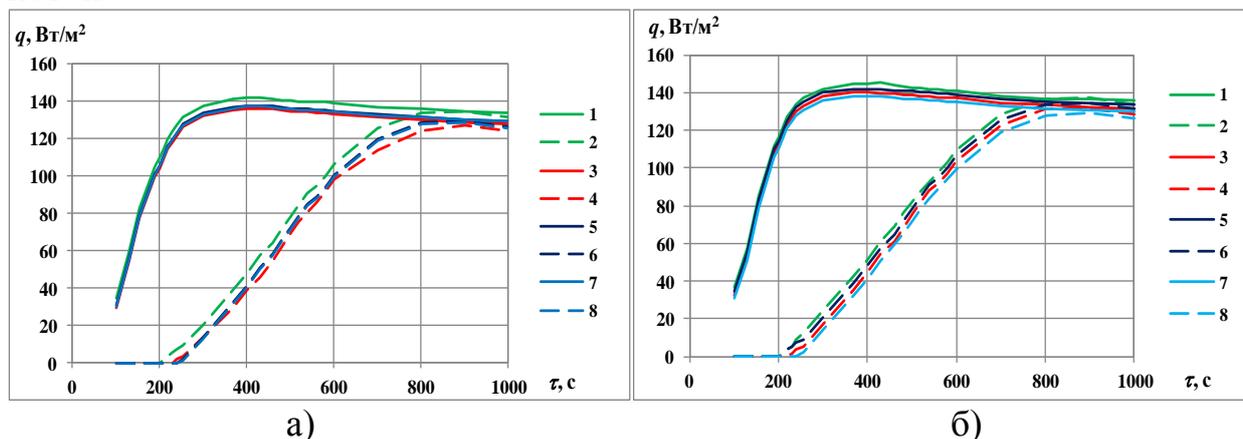


Рис. 7. Сравнение плотностей теплового потока для различных схем испытаний для экранов А (а) и В (б): кривые 1,2 – схема 1, кривые 3,4 – схема 2, кривые 5,6 – схема 3, кривые 7,8 – схема 4.

Видно, что плотности тепловых потоков для экранов А и В для различных схем измерений достаточно хорошо совпадают в условиях установившегося режима теплообмена, что свидетельствует о достоверности предложенной модели по определению теплового воздействия через слой ЭВТИ.

Первоначальной целью второго экспериментального исследования, являлась оценка эффективности многослойного теплоизоляционного покрытия ЕТТИ-МЛИ-ТКС, схема которого приведена на рис. 8.

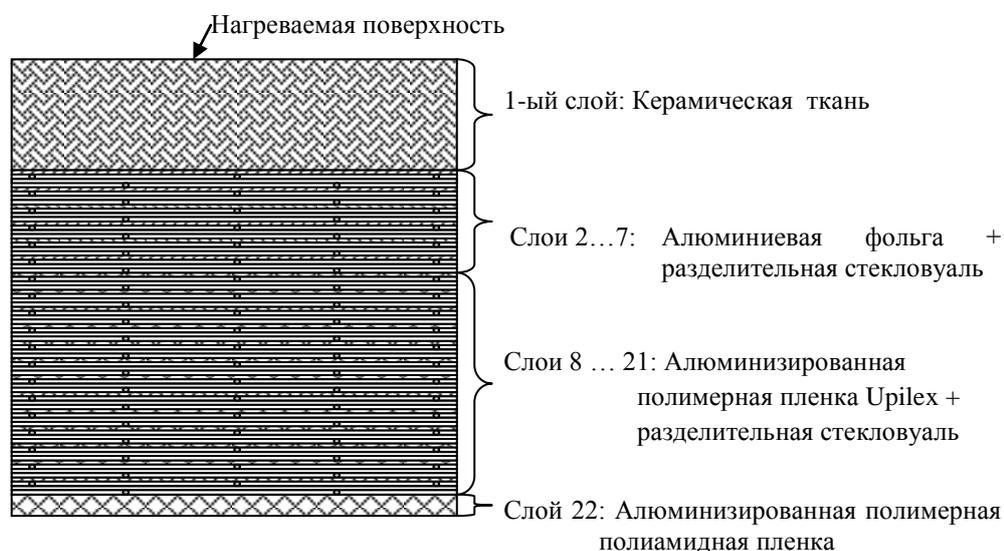


Рис. 8. Схема теплоизоляционного покрытия МЛИ ЕТТИ-МЛИ-ТКС.

Результаты испытания образцов 2с и 2d покрытия ЕТТИ-МLI-TCS на этапах начального нагрева и конечного охлаждения представлены на рис. 9.

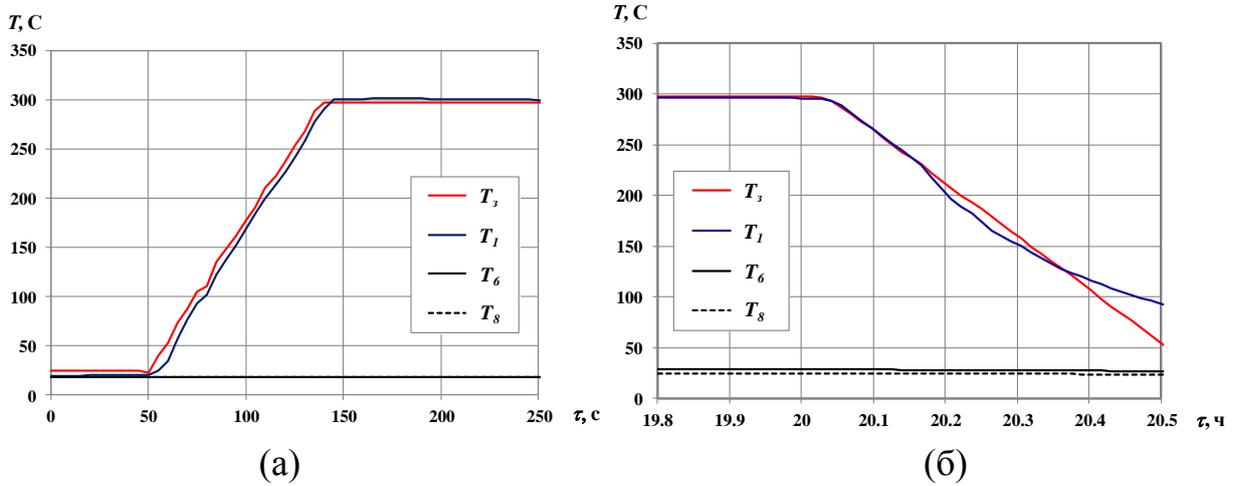


Рис. 9. Результаты температурных измерений в образцах 2с и 2d на этапах (а) начального нагрева и (б) финального охлаждения.

На основании метода, представленного в главе 2, разработана математическая модель, описывающая переходное состояние для физической модели, предложенной в эксперименте. Полученная система уравнений учитывает набор из $L = 21$ изотермических непрозрачных экранов с одним дополнительным слоем, соответствующим медной пластине, расположенной на внутренней стороне образца покрытия. Волокнистые разделительные слои, расположенные между слоями покрытия, не рассматриваются как отдельные элементы ЭВТИ, но их влияние на радиационный теплоперенос учитывается, как это представлено в главе 2. Тепловое излучение от слоя керамической ткани рассматривается в качестве внешнего теплового потока. Также присутствует радиационный теплоперенос между медной пластиной и стальной стенкой камеры. Данная стенка охлаждается водой для предотвращения ее нагрева в ходе эксперимента. Результирующая математическая модель выглядит следующим образом:

$$c_1 \rho_1 \delta_1 \frac{dT_1}{d\tau} = \varepsilon_{a,1}^{eff} \sigma (T_a^4 - T_1^4) - \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} q_{1,2,\lambda} d\lambda, \quad T_1(0) = T_{10}, \quad T_a = T_a(\tau) \quad (4a)$$

$$c_l \rho_l \delta_l \frac{dT_l}{d\tau} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} (q_{l-1,l,\lambda} - q_{l,l+1,\lambda}) d\lambda, \quad T_l(0) = T_{l0}, \quad l = 2, \dots, 20 \quad (4b)$$

$$c_L \rho_L \delta_L \frac{dT_L}{d\tau} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} q_{L-1,L,\lambda} d\lambda + \varepsilon_{L,c}^{eff} \sigma (T_c^4 - T_L^4), \quad T_L(0) = T_{L0} \quad (4c)$$

$$c_c \rho_c \delta_c \frac{dT_c}{d\tau} = \varepsilon_{L,c}^{eff} \sigma (T_L^4 - T_c^4) + \varepsilon_{s,c}^{eff} \sigma (T_s^4 - T_c^4), \quad T_c(0) = T_{c0} \quad T_s = T_s(\tau) \quad (4d)$$

$$\tau \in (\tau_{min}, \tau_{max}]$$

где $\varepsilon_{L,c}^{eff} = \frac{\varepsilon_L \varepsilon_c}{\varepsilon_L + \varepsilon_c - \varepsilon_L \varepsilon_c}$ $\varepsilon_{c,s}^{eff} = \frac{\varepsilon_c \varepsilon_s}{\varepsilon_c + \varepsilon_s - \varepsilon_c \varepsilon_s}$ – приведенная

излучательная способность системы соседних слоев. Индекс “a” обозначает нагреваемую керамическую ткань, индексы “l” and “L” – экраны ЭВТИ ($l = 1, \dots, 6$ – алюминиевая фольга, $l = 7, \dots, 20$ – алюминизированный полимер Upilex и L – алюминизированный полиамидный полимер), индексы “c” и “s” – медную пластину и стальную стенку камеры соответственно.

Результаты вычисления в условиях экспериментального нагрева и охлаждения представлены на рис. 10.

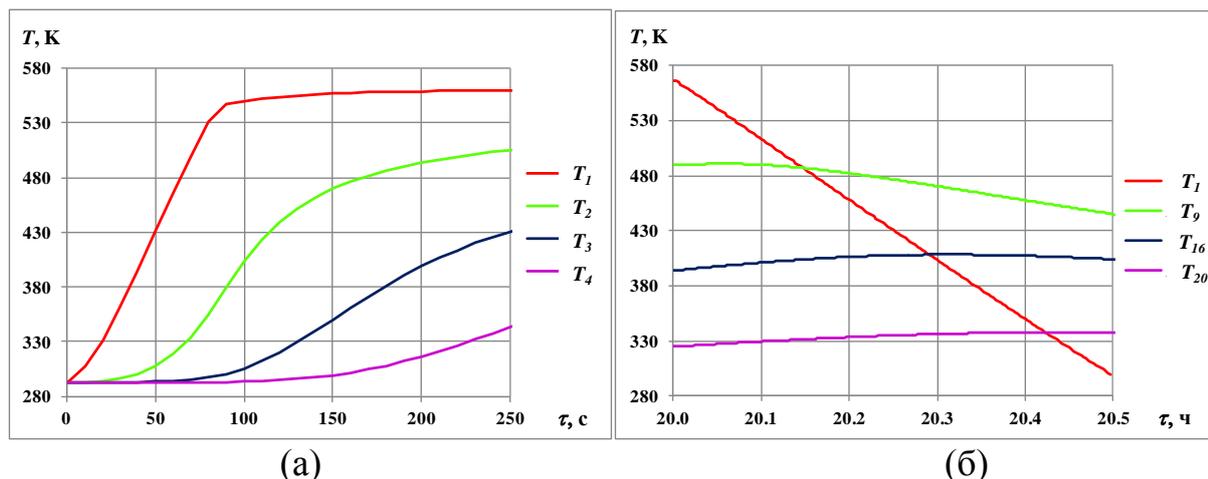


Рис. 10. Результаты вычислений температуры слоев ЭВТИ на этапах (а) начального нагрева и (б) финального охлаждения.

Как видно из рис. 10, температура глубоких слоев, расположенных далеко от нагреваемой поверхности, невысокая и обладает слабой чувствительностью к изменениям температуры нагреваемого слоя. Более того, температура слоев с номерами около 16 и более продолжает расти в течение получаса после начала охлаждения нагревателя. Это говорит о большой тепловой инертности ЭВТИ.

Сравнение расчетной и измеренной температур внутренней поверхности ЭВТИ представлено на рис. 11. Здесь T_{calc} – расчетная температура последнего слоя ЭВТИ. Как видно из графика, теоретический прогноз, как для уровня температуры, так и для режимов нагрева и охлаждения, довольно точен, что позволяет использовать разработанную математическую модель для анализа тепловых свойств ЭВТИ в широком диапазоне.

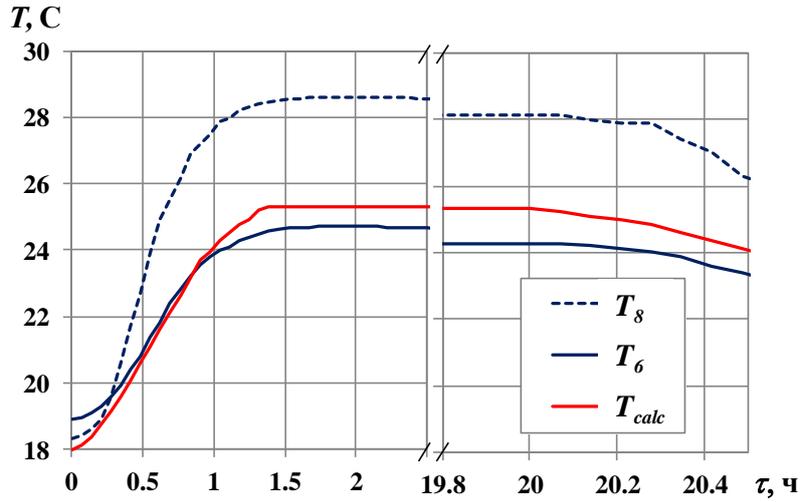


Рис. 11. Сравнение расчетной и измеренной температур внутренней поверхности ЭВТИ.

В четвертой главе представлен алгоритм решения задачи параметрической идентификации математической модели теплопереноса в ЭВТИ. В силу некорректности обратных задач для их решения необходимо использовать специальные регуляризирующие методы и алгоритмы, обеспечивающие устойчивые приближенные решения. В данной работе для построения регуляризирующего оператора используется метод итерационной регуляризации.

Рассмотрено применение данного метода к обратным задачам по восстановлению зависящих от температуры характеристик теплообмена в элементе ЭВТИ. При этом учтено наличие волокнистых разделителей между слоями ЭВТИ, как это предложено в главе 2. Вектор теплового состояния такой системы удовлетворяет следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned}
 c_1(T_1)\rho_1\delta_1 \frac{dT_1}{d\tau} &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} (q_{a,1,\lambda}(T_a, T_1) - q_{1,2,\lambda}(T_1, T_2)) d\lambda, \\
 \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}], T_a &= T_a(\tau) \\
 c_l(T_l)\rho_l\delta_l \frac{dT_l}{d\tau} &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} (q_{l-1,l,\lambda}(T_{l-1}, T_l) - q_{l,l+1,\lambda}(T_l, T_{l+1})) d\lambda, \\
 \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}], l &= \overline{2, L-1} \\
 c_L(T_L)\rho_L\delta_L \frac{dT_L}{d\tau} &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} q_{L-1,L,\lambda}(T_{L-1}, T_L) d\lambda + k_{in}(T_L, T_{in})(T_{in} - T_L), \\
 \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}] \\
 T_l(\tau_{\min}) &= T_{l0}, \quad l = \overline{1, L}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\text{где } q_{l,l+1,\lambda}(T_l, T_{l+1}) = \frac{f_{l,\lambda}(T_l) - f_{l+1,\lambda}(T_{l+1})}{\frac{1}{\varepsilon_{l,\lambda}(T_l)} + \frac{1}{\varepsilon_{l+1,\lambda}(T_{l+1})} + \frac{2}{1+T_\lambda - R_\lambda} - 2}$$

Целью параметрической идентификации математической модели является определение теплофизических коэффициентов уравнения c_l , $l = \overline{1, L}$, ε_l , $l = \overline{1, L}$, ε_a , k_{in} . Предположим, что среди них имеется несколько неизвестных характеристик u_i , $i = \overline{1, N_u}$.

В качестве дополнительного условия, необходимого для решения задачи идентификации, используются экспериментально полученные зависимости температуры отдельных слоев системы от времени $T_m^{\text{exp}}(\tau) = f_m$, $m = \overline{1, M}$.

Решение поставленной задачи ищется путем минимизации функционала среднеквадратичного отклонения расчетных значений температур от экспериментальных:

$$J(\bar{u}) = \sum_{l=1}^L \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} (T_l(\tau) - f_l(\tau))^2 d\tau \quad (6)$$

Минимизации функционала (6) осуществляется с использованием градиентных методов минимизации. Последовательность приближений решения, минимизирующая целевой функционал имеет вид:

$$u^{s+1} = u^s + \gamma_s G(J_u'(u^s)), \quad s = 0, 1, \dots, s^* \quad (7)$$

где s – номер итерации; γ_s – глубина спуска, выбираемая из условия

$$\gamma_s = \text{Arg min}_{\gamma > 0} J(u^s + \gamma G(J_u'(u^s))), \quad (8)$$

где $J_u'(u^s)$ – градиент функционала, $G^s(J_u'(u^s))$ – оператор, характеризующий используемый метод минимизации, u^0 – задаваемое априорно начальное приближение, s^* – номер последней итерации, определяемый в процессе решения задачи из регуляризирующего условия останова:

$$s^* : J(u^{s^*}) \cong \varepsilon(h, \delta) \quad (9)$$

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. В данной работе метод определения градиента базируется на использовании сопряженной краевой задачи. Выражение для градиента можно получить, представив искомые зависимости в параметрическом виде:

$$\begin{aligned} c_l(T) &= \sum_{k=1}^{N_{c_l}} c_k^l \varphi_k^{c_l}(T), \quad l = \overline{1, L}, \\ \varepsilon_{a,\lambda}(T) &= \sum_{k=1}^{N_{\varepsilon_a}} e_k^a \varphi_k^{\varepsilon_a}(\lambda, T) \\ \varepsilon_{l,\lambda}(T) &= \sum_{k=1}^{N_{\varepsilon_l}} e_k^l \varphi_k^{\varepsilon_l}(\lambda, T), \quad l = \overline{1, L} \end{aligned} \quad (10)$$

$$k_{in}(T) = \sum_{k=1}^{N_{k_{in}}} k_k^{in} \varphi_k^{k_{in}}(T),$$

где $c_k^l, k = \overline{1, N_{c_l}}, e_k^a, k = \overline{1, N_{\varepsilon_a}}, e_k^l, k = \overline{1, N_{\varepsilon_l}}, k_k^{in}, k = \overline{1, N_{k_{in}}}$ - неизвестные параметры аппроксимации,

$\varphi_k^{c_l}(T), k = \overline{1, N_{c_l}}, \varphi_k^{\varepsilon_a}(\lambda, T), k = \overline{1, N_{\varepsilon_a}}, \varphi_k^{\varepsilon_l}(\lambda, T), k = \overline{1, N_{\varepsilon_l}}, \varphi_k^{k_{in}}(T), k = \overline{1, N_{k_{in}}}$, - заданная система базисных функций.

Для сокращения временных затрат с использованием линейной оценки параметра спуска для вычисления параметра γ получена приближенная аналитическая форма.

Проверка эффективности разработанного алгоритма проводится с помощью универсального подхода, представляющего собой вычислительный эксперимент, выполненный в условиях тепловых испытаний, рассмотренных в главе 3. Данное исследование проводится следующим образом: сначала решается прямая задача теплообмена в образце в предположении, что все характеристики материала известны. Затем, используя полученные значения температур в предполагаемых точках установки термодатчиков, формируются "экспериментальные" данные, необходимые для решения обратной задачи. И после этого решается обратная задача по определению искомой величины.

Модель (4a) – (4d) включает в себя некоторые неопределенности в свойствах материала. Спектральная излучательная способность нагреваемой керамической ткани является основной из них. Поэтому в данной главе решается задача идентификации данной характеристики (а именно $\varepsilon_{a,\lambda}$) посредством решения обратной задачи теплообмена.

Результаты температурных измерений в медной пластине (4d) можно рассматривать как дополнительную информацию, необходимую для решения обратной задачи теплообмена.

$$T_l^{\text{exp}}(\tau) = f_l \quad (11)$$

Алгоритм решения обратной задачи разработан на основании предложенной ранее методики. Неизвестный коэффициент может быть аппроксимирован с помощью некоторой системы базисных функций (в частности, кусочно-гладкие функции или В-сплайны).

$$\varepsilon_{a,\lambda}(\lambda) = \sum_{k=1}^N e_k \varphi_k(\lambda) \quad (12)$$

Градиент минимизируемого функционала вычисляется с использованием решения сопряженной задачи.

$$J'_{e_k} = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \psi_1 \left(\frac{\varphi_k(\lambda) \varepsilon_{1,\lambda} (1 + T_\lambda - R_\lambda)}{(\varepsilon_{1,\lambda} (1 + T_\lambda - R_\lambda) + \varepsilon_{a,\lambda} (1 + T_\lambda - R_\lambda) + 2\varepsilon_{a,\lambda} \varepsilon_{1,\lambda} - 2\varepsilon_{a,\lambda} \varepsilon_{1,\lambda} (1 + T_\lambda - R_\lambda))} \right. \\ \left. \frac{\varepsilon_{a,\lambda} \varepsilon_{1,\lambda} (1 + T_\lambda - R_\lambda) \varphi_k(\lambda) ((1 + T_\lambda - R_\lambda) + 2\varepsilon_{1,\lambda} - 2\varepsilon_{1,\lambda} (1 + T_\lambda - R_\lambda))}{(\varepsilon_{1,\lambda} (1 + T_\lambda - R_\lambda) + \varepsilon_{a,\lambda} (1 + T_\lambda - R_\lambda) + 2\varepsilon_{a,\lambda} \varepsilon_{1,\lambda} - 2\varepsilon_{a,\lambda} \varepsilon_{1,\lambda} (1 + T_\lambda - R_\lambda))^2} \right) (f_{a,\lambda} - f_{1,\lambda}) d\lambda \quad (13)$$

где ψ_1 - решение следующей сопряженной задачи:

$$\begin{aligned}
-c_1 \rho_1 \delta_1 \frac{d\psi_1}{d\tau} &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \left(\frac{-\varepsilon_{a,\lambda} \varepsilon_{1,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda) \frac{df_1}{dT_1} \psi_1(\tau)}{(\varepsilon_{1,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda) + \varepsilon_{a,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda) + 2\varepsilon_{a,\lambda} \varepsilon_{1,\lambda} - 2\varepsilon_{a,\lambda} \varepsilon_{1,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda))} \right. \\
&\quad \left. - \frac{\varepsilon_{1,\lambda} \varepsilon_{2,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda) \frac{df_{1,\lambda}}{dT_1} (\psi_1(\tau) - \psi_2(\tau))}{(\varepsilon_{2,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda) + \varepsilon_{1,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda) + 2\varepsilon_{1,\lambda} \varepsilon_{2,\lambda} - 2\varepsilon_{1,\lambda} \varepsilon_{2,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda))} \right) d\lambda, \\
\psi_1(\tau_{\max}) &= 0, \\
-c_l \rho_l \delta_l \frac{d\psi_l}{d\tau} &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \left(\frac{\varepsilon_{l-1,\lambda} \varepsilon_{l,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda) \frac{df_{l,\lambda}}{dT_l} (\psi_{l-1}(\tau) - \psi_l(\tau))}{(\varepsilon_{l,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda) + \varepsilon_{l-1,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda) + 2\varepsilon_{l,\lambda} \varepsilon_{l-1,\lambda} - 2\varepsilon_{l,\lambda} \varepsilon_{l-1,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda))} \right. \\
&\quad \left. - \frac{\varepsilon_{l,\lambda} \varepsilon_{l+1,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda) \frac{df_{l,\lambda}}{dT_l} (\psi_l(\tau) - \psi_{l+1}(\tau))}{(\varepsilon_{l+1,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda) + \varepsilon_{l,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda) + 2\varepsilon_{l,\lambda} \varepsilon_{l+1,\lambda} - 2\varepsilon_{l,\lambda} \varepsilon_{l+1,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda))} \right) d\lambda, \tag{4.35}
\end{aligned}$$

$$\psi_l(\tau_{\max}) = 0, \quad l = 2, \dots, 20$$

$$-c_L \rho_L \delta_L \frac{d\psi_L}{dt} = \int_{\lambda_{\max}}^{\lambda_{\min}} \left(\frac{\varepsilon_{L-1,\lambda} \varepsilon_{L,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda) \frac{df_{L,\lambda}}{dT_L} (\psi_{L-1}(\tau) - \psi_L(\tau))}{\varepsilon_{L,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda) + \varepsilon_{L-1,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda) + 2\varepsilon_{L,\lambda} \varepsilon_{L-1,\lambda} - 2\varepsilon_{L,\lambda} \varepsilon_{L-1,\lambda} (1+T_\lambda - R_\lambda)} \right) d\lambda +$$

$$+ 4 \mathcal{E}_{L,c}^{\text{eff}} \sigma T_L^3 (\psi_c - \psi_L),$$

$$\psi_L(\tau_{\max}) = 0$$

$$-c_c \rho_c d_c \frac{d\psi_c}{d\tau} = 4 \mathcal{E}_{L,c}^{\text{eff}} \sigma T_c^3 (\psi_L - \psi_c) - 4 \mathcal{E}_{c,s}^{\text{eff}} \sigma T_c^3 \psi_c + 2(T_c(\tau) - f(\tau)),$$

$$\psi_c(\tau_{\max}) = 0$$

Для оценки эффективности представленного алгоритма были обработаны результаты вычислительного эксперимента (соответствующего испытаниям ЭВТИ ЕТТИ-MLI-TCS, рассматриваемым в главе 3). Восстанавливалось значение $\varepsilon_{a,\lambda}$ (рис. 12).

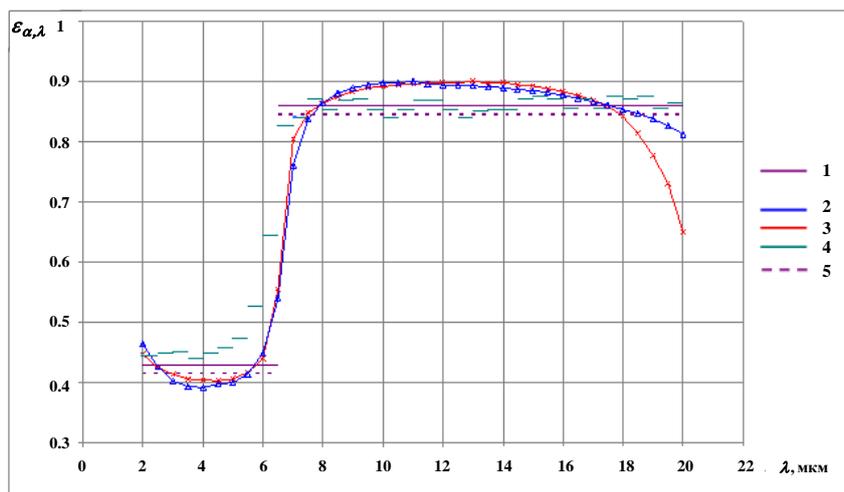


Рис. 12. Восстановленные значения $\varepsilon_{a,\lambda}$: 1 – “точное” значение, используемое для моделирования, 2 – оценка с аппроксимацией кубическими В-сплайнами (N=3), 3 – оценка с аппроксимацией кубическими В-сплайнами (N=5), 4 – оценка с аппроксимацией кусочно-постоянной функцией (N=36), 5 – оценка с аппроксимацией кусочно-постоянной функцией (N=2).

На рис. 13 и в таблице 1 приведено сравнение “экспериментальных” полученных значений температур медной пластины и результатов расчетов температуры медной пластины для восстановленных значений $\varepsilon_{a,\lambda}$, полученных с помощью различных аппроксимаций.

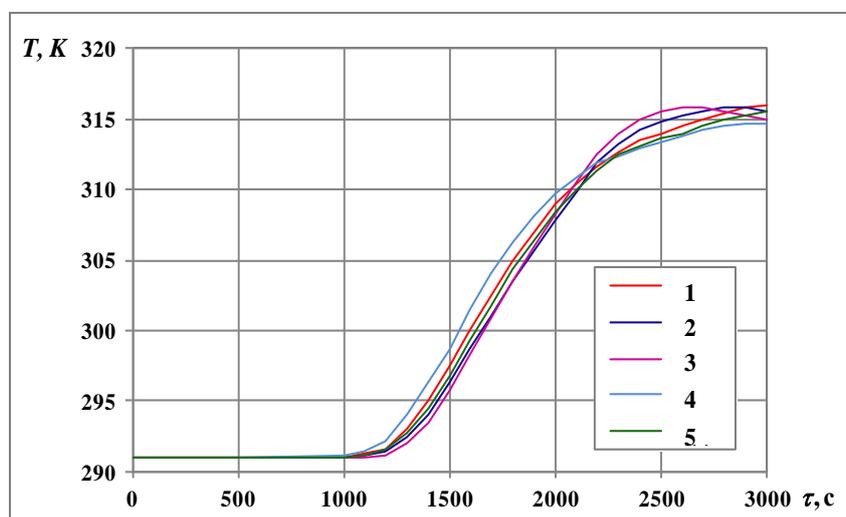


Рис. 13. Сравнение теоретического прогноза и экспериментальных данных для температуры медной пластины: 1 – “эксперимент”, 2 – аппроксимация кубическими В-сплайнами (N=3), 3–аппроксимация кубическими В-сплайнами (N=5), 4 – аппроксимация кусочно-постоянной функцией (N=36), 5 – аппроксимация кусочно-постоянной функцией (N=2).

Таблица 1. Отклонения расчетной и “измеренной” температур.

Аппроксимация	Отклонения температуры по методу наименьших квадратов (К)	Отклонения температуры (%)	Максимальные температурные отклонения (К)	Максимальные температурные отклонения (%)
1	1.24	4.1	2.5	7.1
2	1.16	4.3	2.3	7.5
3	1.21	4.7	2.4	6.2
4	0.37	2.4	1.2	4.3

Как и следовало ожидать, минимальный набор параметров аппроксимации обеспечивает лучшую точность и стабильность решения обратных задач. Хотя в случае приближения кусочно-постоянной функцией с $N = 2$ использовалась априорная информация о границе двухполосного излучения волокон (около 6.5 мкм), но оценку этой величины можно найти из любого другого приближения (рис. 12, кривые 2-4).

Полученный алгоритм решения обратной задачи используется также для восстановления величины $\varepsilon_{a,\lambda}$ в условиях реального экспериментального нагрева. Приближенные оценки величины $\varepsilon_{a,\lambda}$ для различных приближений представлены на рис. 14.

Восстановленные значения $\varepsilon_{a,\lambda}$ оказываются менее точными по сравнению со значениями, полученными на основании вычислительного эксперимента с увеличенной температурой нагревательного элемента. Такие результаты объясняются главным образом недостаточным уровнем прогрева слоев ЭВТИ в условиях реального эксперимента.

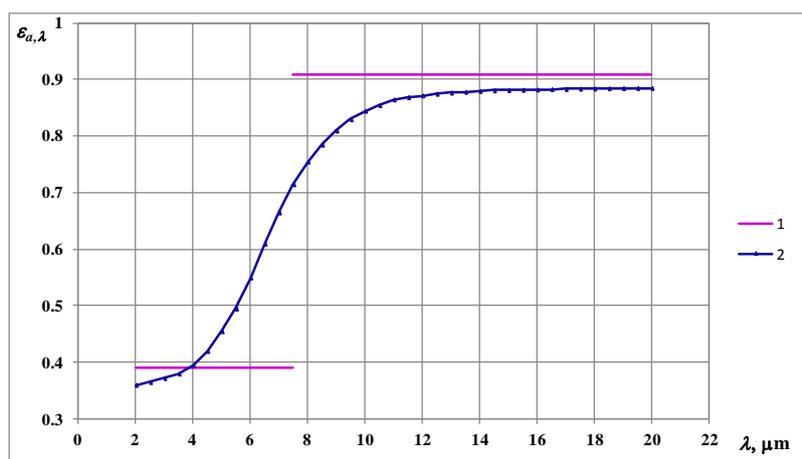


Рис. 14. Восстановленные значения $\varepsilon_{a,\lambda}$: 1 – оценка с аппроксимацией кубическими В-сплайнами ($N=3$), 2 – оценка с аппроксимацией кусочно-постоянной функцией ($N=2$).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Рассмотрены основные виды тепловых потоков, действующих на космический аппарат во время орбитального полета, особенности их моделирования. В результате разработана методика по определению внешнего теплового воздействия на КА, реализованная в виде программы, написанной на языке FORTRAN. Данная программа позволяет вычислять тепловые потоки без проведения дополнительных исследований, только на основании имеющихся геометрических характеристик КА и программы полета.

2. Рассмотрены процессы переноса излучения в ЭВТИ, состоящем из металлических (металлизуемых) экранов и волокнистого разделителя между ними. Получено выражение для определения потока излучения через такие элементы, учитывающее отражение и пропускание излучения высокопористого волокнистого разделителя, определяемые на основании теории независимости рассеяния и теории Ми для бесконечного однородного цилиндра, а также данных о дисперсном составе волокнистого материала. В предположении, что материалом экранов ЭВТИ является алюминий, учтено также наличие возможной оксидной пленки на его поверхности и оценено влияние такой пленки на излучательную способность алюминиевой фольги. Показано, что наличие слоя оксида приводит к значительному увеличению потока теплового излучения через слой ЭВТИ.

3. Методика по определению теплового потока через слой ЭВТИ, представленная в главе 2, апробирована в процессе моделирования процессов теплообмена в образце ЭВТИ и последующего сравнения результатов моделирования с результатами тепловых испытаний образцов, имитирующих элементы ЭВТИ. Результаты сравнения расчетных значений плотностей тепловых потоков свидетельствуют о достоверности предложенной модели.

4. Проанализированы данные экспериментального исследования реального образца ЭВТИ. Составлена математическая модель теплообмена в ЭВТИ, учитывающая наличие разделительных слоев между экранами. Показано, что теоретический прогноз довольно точно соответствует результатам измерений температуры, что позволяет использовать разработанную математическую модель для анализа тепловых свойств ЭВТИ.

5. Представлен общий алгоритм решения обратных задач для систем с сосредоточенными параметрами, который распространен на частный случай идентификации модифицированной математической модели ЭВТИ, рассмотренной во второй и третьей главах. Разработан итерационный алгоритм для решения такой задачи, получены аналитические выражения для вычисления градиента функционала невязки и составлена краевая задача для сопряженной переменной. Также получена краевая задача для вариации температуры, позволяющая вычислить линейную оценку глубины спуска.

6. Разработанный алгоритм и результаты вычислительного эксперимента используются для восстановления спектральной излучательной способности нагреваемой керамической ткани $\varepsilon_{a,\lambda}$. Показано, что предложенный алгоритм позволяет вычислять искомую величину с высокой точностью.

7. Рассмотрены перспективные варианты исполнения разделительных слоев ЭВТИ. Показано, что использование плотных разделителей из кварцевых волокон, покрытых тонким слоем алюминия, приводит к значительному уменьшению плотности теплового излучения через слой ЭВТИ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. Грицевич И.В., Домбровский Л.А., Ненарокомов А.В. Перенос тепла излучением в экрано-вакуумной тепловой изоляции космических аппаратов // Тепловые процессы в технике, М.: Наука и технологии, 2013, Т. 5, № 1, С. 12-21

2. Грицевич И.В., Ненарокомов А.В. Определение внешнего теплового воздействия на поверхность орбитального космического аппарата // Тепловые процессы в технике, М.: Наука и технологии, 2013, Т. 5, № 10, с. 445-457

3. Gritsevich I.V., Dombrovsky L.A., Nenarokomov A.V. Radiative transfer in vacuum thermal insulation of space vehicles // Computational Thermal Sciences, 2014, V. 6, N.2, P.103–111

Публикации в других научных изданиях

4. Грицевич И.В. Уточненная тепловая модель экрано-вакуумной теплоизоляции космических аппаратов. В сборнике «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках, 19-23 мая 2013г.» Тезисы докладов, М: МЭИ, С. 363 – 364

5. Gritsevich I.V., Dombrovsky L.A., Nenarokomov A.V. Radiative transfer in vacuum thermal insulation of space vehicles. Proc. 7th Int. Symp. Radiat. Transf., 2-8 June 2013, Kusadasi, Turkey

6. Nenarokomov A.V., Dombrovsky L.A., Krainova I.V., Alifanov O.M., Budnik S.A. Identification of radiative heat transfer parameters in multilayer thermal insulation of a spacecraft. Proceedings of the 8th International Conference on Inverse Problems in Engineering ICIPE-2014, Poland, Cracow, 12-15 May 2014

7. Nenarokomov A.V., Dombrovsky L.A., Krainova I.V., Alifanov O.M., Budnik S.A. Heat transfer in vacuum thermal insulation of space vehicles: an experimental estimate vs theoretical prediction. Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference, Kyoto, Japan, 10-15 August 2014, IHTC-15-9822/RAD-J-421