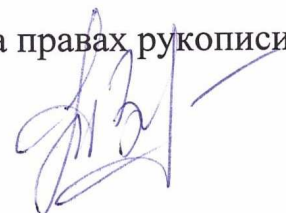


**МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

На правах рукописи



Моржухина Алена Вячеславовна

**ВЫСОКОТОЧНЫЕ МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛООБМЕНА В СЛОЯХ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ
ПОКРЫТИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальности

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

05.07.03 - Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель: член-корреспондент РАН, д.т.н.,
профессор Алифанов Олег Михайлович

Научный консультант: д.т.н., доцент

Черепанов Валерий Вениаминович

Москва – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Глава 1. Проблема точности при идентификации и исследовании физических свойств теплозащитных материалов и покрытий. Аналитический обзор	11
1.1. Системы тепловой защиты космических летательных аппаратов. Вопросы проектирования и материалы.....	11
1.2. Основные причины возникновения погрешностей термопарных измерений в телах непрозрачных для лучистого нагрева.....	14
1.3. Определение температурного поля в полупрозрачных материалах.....	20
1.4. Задачи исследования.....	23
Выводы по главе 1.....	25
Глава 2. Физическое моделирование процессов теплообмена в слоях тепловой защиты космических летательных аппаратов	26
2.1 Выбор материала.....	26
2.2 Геометрические размеры и форма экспериментального образца..	33
Выводы по главе 2.....	37
Глава 3. Метод математического моделирования комбинированного теплообмена в образцах	38
3.1. Основные уравнения задачи о комбинированном радиационно-кондуктивном теплообмене в плоской пластине.....	38
3.2 Описание радиационного теплопереноса в плоском слое частично прозрачного материала.....	39
3.3. Численный метод решения задачи радиационно-кондуктивного теплообмена.....	42
3.4. Проверка численного метода на точных аналитических решениях.....	44
3.5. Численный метод решения кинетической задачи переноса излучения.....	46

3.5.1	Двухшаговая схема «предиктор-корректор».....	50
3.5.1.1.	Анализ работы «предиктора».....	50
3.5.1.2	Анализ работы «корректора».....	53
3.5.2	Трехшаговое расщепление «по физическим процессам».....	54
	Выводы по главе 3.....	58
Глава 4.	Результаты экспериментального исследования.....	59
4.1.	Подготовка тепловых испытаний. Цели и задачи.....	59
4.2.	Методика проведения тепловых испытаний. Предварительные испытания.....	67
4.3.	Тепловые испытания.....	72
4.4.	Анализ результатов тепловых испытаний.....	88
	Выводы по главе 4.....	94
Глава 5.	Интерпретация результатов моделирования и экспериментальных данных	95
5.1.	Результаты математического моделирования.....	95
5.2.	Сравнительный анализ результатов теоретического и математического исследования.....	98
5.3.	Обоснование математической модели.....	102
	Выводы по главе 5.....	109
	Заключение.....	110
	Список литературы.....	112

Введение

Актуальность работы

Обеспечение надежной защиты элементов конструкций летательных аппаратов (ЛА) от нагрева во время полета в атмосфере со скоростями, значительно превышающими скорость звука, была и остается одной из наиболее важных задач при проектировании изделий ракетно-космической техники. Одним из возможных путей решения общей задачи улучшения энергомассовых характеристик космических летательных аппаратов может являться создание тепловой защиты с использованием инновационных материалов с высокими удельными массовыми, прочностными и теплозащитными характеристиками. Проблемы разработки, создания и применения новых материалов являются актуальными и нуждаются в проведении дополнительных исследований.

Ключевыми факторами, определяющим использование уже существующих и внедрение новых теплозащитных материалов, являются достоверные данные о теплофизических характеристиках (ТФХ) таких материалов, которые, в основном, получают экспериментальным путем. Результаты экспериментальных исследований вследствие неточностей, имеющих место во время самого эксперимента, могут приводить к достаточно большим различиям между истинными характеристиками материала и экспериментально вычисленными. Проблему достоверного определения ТФХ усложняет то обстоятельство, что для большой номенклатуры теплоизоляционных и теплозащитных материалов данные по ключевым исходным позициям могут существенно отличаться у различных производителей и разработчиков.

Неточности в исходных теплофизических данных при проектировании теплозащитных систем ЛА приходится учитывать введением соответствующих проектных запасов, в частности, по толщинам слоев теплозащитных пакетов, которые тем больше увеличивают суммарную массу теплозащиты, чем выше

погрешности в определении теплофизических характеристик материалов слоев. Все это делает задачу рационального технического планирования экспериментальных исследований, корректного определения ТФХ и уточнения существующих данных для определенных классов материалов актуальной и требующей решения

Данные о тепловом состоянии исследуемых образцов материала часто получают за счет использования термопарных датчиков. Практическая необходимость в обеспечении контроля точности термопарных измерений на всех этапах экспериментальных исследований подразумевает определение основных механизмов формирования их погрешности, создание методических рекомендаций по прогнозированию ошибок температурных измерений с привлечением как уже существующих методик (работы Елисеева В.Н., Товстонога В.А., Соловова В.А., Резника С.В.), так и новых комплексных подходов к созданию системы теплофизической метрологии, основанной на экспериментальных тепловых исследованиях, методах обратных задач идентификации и применении статистического подхода к построению расширенных математических моделей исследуемых материалов (работы Алифанова О.М., Божкова Н.А., Черепанова В.В.). Одновременное использование результатов численного моделирования и выходных данных экспериментального исследования материалов позволяет оценивать точность проведенных прикладных исследований и уточнять данные тепловых испытаний для их последующей обработки.

Вышеизложенное делает задачу прогнозирования и верификации данных экспериментальных исследований теплозащитных материалов актуальной. Вопросы, связанные, с разработкой высокоточных методов математического и экспериментального исследования свойств остаются наиболее неизученными в высоко – и ультрапористых материалах и нуждаются в более детальном рассмотрении.

Цель работы

Данная работа посвящена созданию методики по обработке результатов термопарных измерений в высоко - и ультрапористых теплозащитных материалах в условиях их нестационарного нагрева. В ней рассматриваются вопросы построения методов обнаружения методических погрешностей термопар и обобщению методов интерпретации их показаний для последующего исследования указанных классов теплозащитных материалов.

Задачи работы:

1. Анализ текущего состояния проблем определения погрешностей температурных измерений в образцах жаропрочных конструкционных материалов.

2. Разработка высокоточных математических методов и создание корректной математической модели определения температурного поля внутри образца полупрозрачного материала, используемого в качестве теплозащитного покрытия летательного аппарата, испытывающего радиационный и кондуктивный нестационарный нагрев.

3. Применение разработанной математической модели при планировании экспериментального исследования, определения основных механизмов формирования величины погрешности при термопарных измерениях, и для контроля точности и корректировки данных тепловых испытаний.

4. Оценка влияния выбранных режимов нагрева на погрешности измерения термопар, установленных в образцах исследуемых материалов.

5. Проведение сравнительного анализа результатов данных тепловых испытаний для различных режимов нагрева и с использованием термопар разных размеров, создание рекомендации по местам их установки.

Методы исследования

Основные данные работы получены по результатам экспериментально-теоретического исследования, проведенного по оригинальной методике на специальном тепловакуумном стенде. В основу разработанного программного

инструмента положен оригинальный высокоточный сеточный численный метод решения нестационарной нелинейной задачи комбинированного радиационно-кондуктивного теплообмена в пластине высокопористого теплозащитного материала, подвергаемого нестационарному тепловому нагреву, апробированный метод решения кинетического уравнения переноса излучения в плоском слое, учет оптических и радиационных характеристик исследуемого материала.

Научная новизна

1. Разработаны и исследованы численные методы, создан необходимый программный инструмент, позволяющий точно моделировать процесс комбинированного теплообмена в экспериментальных образцах, определять их тепловое состояние при нестационарном внешнем тепловом воздействии.

2. При проведении экспериментальных исследований теплового состояния исследуемого высокопористого материала разработаны новые конструктивно-технологические решения экспериментального модуля. Осуществлялся непрерывный контроль точности измерения в ходе всего теплофизического эксперимента.

3. Определены основные факторы, влияющие на погрешность показания термопар, установлена величина погрешности в широком диапазоне изменения температуры образца.

Теоретическая и практическая ценность работы

Полученные результаты могут быть использованы при подготовке и проведении теплотехнических испытаний образцов высокопористых теплозащитных материалов, для уточнения ТФХ характеристик определенного класса материалов, при проектировании высокотемпературных тепловых покрытий ЛА. Данная работа может послужить основой для дальнейшего анализа и учета погрешностей температурных измерений, которые, как показано в работе, влияют на точность прикладных теплофизических исследований высокопористых теплозащитных и теплоизоляционных материалов.

Достоверность и обоснованность работы подтверждается результатами сравнительного анализа с существующими решениями отдельных задач подобного типа. Результаты численного моделирования и экспериментальных тепловых исследований подтверждают точность и корректность разработанной методологии.

Апробация работы

Основные научные результаты работы докладывались на научно-технических конференциях. В частности, на международной конференции «Eurotherm Conference №.95: Computational Thermal Radiation in Participating Media IV» (Нанси, Франция, 18-20 апреля 2012г.), на XIV Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, Белоруссия, 10-13 сентября 2012г.), на конференции «Инновации в авиации и космонавтике» (Москва, Россия, 16-18 апреля 2013г.), на конференции «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Орехово-Зуево, Россия, 19-23 мая 2013г.), на международной конференции 3-я Германско-Российская конференция молодых ученых «Авиация и космонавтика» (Third German - Russian week of the young researcher “Aviation and Space”, Новосибирск, Россия, 21-27 сентября 2013г.).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в ряде научно-технических отчетов, 6 публикациях в научных изданиях, из них 2 научные работы опубликованы в изданиях, рекомендуемых Перечнем ВАК при Министерстве образования и науки РФ. Имеются 3 работы принятые к публикации в изданиях, рекомендуемых Перечнем ВАК при Министерстве образования и науки РФ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы; содержит 118 страниц основного текста, 64 рисунка, 9 таблиц, список литературы из 64 наименований.

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 рассмотрены некоторые вопросы проектирования теплозащитных покрытий ЛА и вопросы выбора конструкционных материалов. Приведен краткий анализ влияния методических погрешности термометрических измерений на достоверное определение температуры в образцах исследуемых теплозащитных материалов во время проведения тепловых исследований.

Во второй главе рассмотрена постановка физической задачи исследования. Выбран определенный класс теплозащитных материалов для проведения теоретического и экспериментального исследования – высокопористые теплозащитные материалы на неметаллической основе. Доказано, что для комплексного исследования теплофизических свойств высокопористых теплозащитных материалов, особенно плохо изученных, целесообразно разработать методологию прогнозирования свойств таких материалов с учетом результатов экспериментальных исследований. Данные, полученные по результатам совместного математического и экспериментального исследования, могут использоваться, как и при последующем решении соответствующих обратных задач, так и для определения ТФХ подобных материалов без проведения экспериментальных исследований.

В третьей главе рассмотрен метод математического моделирования комбинированного теплообмена в образце исследуемого материала. Разработана математическая модель расчета радиационно-кондуктивного прогрева исследуемого образца материала, реализованная на программном языке MATLAB. Проведена проверка численного алгоритма на некоторых точных аналитических решениях. Представлен вариант решения уравнения переноса

излучения на кинетическом уровне в рамках трехшагового метода расщепления «по физическим процессам». Для описанного метода также написана программа в рабочей среде MATLAB.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования образцов высокопористого волокнистого композиционного материала ТЗМК-10, подвергаемого нестационарному нагреву.

В пятой главе проведен сравнительный анализ результатов численного и экспериментального исследования образцов материала ТЗМК-10. Выявлены основные механизмы, влияющие на величину методической погрешности

В заключении обобщены результаты диссертационного исследования и представлены выводы по работе.

Глава 1. Проблема точности при идентификации и исследовании физических свойств теплозащитных материалов и покрытий. Аналитический обзор

1.1. Системы тепловой защиты космических летательных аппаратов.

Вопросы проектирования и материалы

С интенсивным развитием ракетно-космической отрасли все острее встает проблема защиты конструкций летательных аппаратов от нагрева во время полета в атмосфере со скоростями, значительно превышающими скорость звука. Современные космические аппараты при возвращении на поверхность планеты во время полета в верхних слоях атмосферы могут достигать скоростей в 25÷30 раз превышающие скорость звука, а температура газа за фронтом ударной волны может достигать значений в десятки тысяч градусов. Как следствие, конструкция аппарата подвергается не только мощному конвективному нагреву, но и воздействию излучения. В таких условиях, традиционно используемые в технике жаропрочные материалы не применимы. Проблема защиты космических летательных аппаратов остается одной из наиболее значимых в программах освоения космоса. Для разработки надежной тепловой защиты нужно знать и учитывать природу всех нагрузок, действующих на космический аппарат во время полета, в том числе механических, тепловых и газодинамических. В настоящее время система тепловой защиты – многопараметрическая система, выполняющая комплекс разных функций [1,2].

Основными задачами тепловой защиты, используемой на космических летательных аппаратах, является не только защита конструкций, систем и агрегатов оборудования от перегрева на этапах выведения или спуска, но и обеспечение необходимого теплового режима в процессе функционирования, особенно у пилотируемых аппаратов. Кроме того, материалы, используемые для тепловой защиты космических аппаратов, должны обладать не только хорошими теплоизоляционными и теплозащитными свойствами, но и быть также максимально легкими и технологичными. В связи с этим в настоящее время

ведутся активные разработки перспективных теплозащитных материалов, обладающими необходимыми прочностными и массовыми характеристиками.

И все же одной из ключевых задач при создании, внедрении и использовании новых теплозащитных материалов и изделий остается определение теплофизических характеристик (ТФХ) таких материалов. Знание ТФХ используемых теплотехнических материалов во всем диапазоне изменения значений температуры позволяет решать задачи оптимального проектирования теплозащитных и теплоизоляционных конструкций (особенно многослойных), создает «реперные» точки для последующей настройки расширенных математических моделей, позволяющих исследовать широкий спектр физических свойств.

Во многом необходимости в определении ТФХ вызваны большой номенклатурой теплоизоляционных материалов. Это приводит к тому, что для многих материалов, особенно новых и перспективных, значения ТФХ не известны с требуемой точностью. Часто они отличаются у различных разработчиков и производителей, что приводит к определенным затруднениям в процессе внедрения перспективных материалов и изделий, увеличению стоимости и сроков создания изделий. С учетом вышеизложенного, можно сделать вывод, что в настоящее время остается актуальной задача достаточно точного определения ТФХ огнеупорных и теплоизоляционным материалов и изделий на их основе в широком диапазоне изменения значений температуры с использованием современных и наиболее эффективных методов и технических средств.

Широко применяемыми и весьма перспективными для решения целого ряда теплотехнических задач являются высокоплотные композиционные материалы на основе углеродной матрицы: углерод-углерод, углерод-керамика, углерод-стекло; высокопористые теплоизоляционные материалы на основе микронных волокон; высокотемпературная керамика и металлокерамика, углепластики, а также различные теплозащитные и теплоизоляционные покрытия и изделия на основе этих материалов [3-5].

В настоящее время для определения теплофизических свойств перспективных теплозащитных материалов активно совершенствуется и эффективно используется экспериментально-расчетная методология, основанная на применении результатов теории обратных задач теплообмена [6-9]. Методы, основанные на решении обратных задач теплообмена, позволяют увеличить информационный выход одного эксперимента, получать значения сразу нескольких теплофизических характеристик и существенно сократить стоимость исследования. При этом также повышается достоверность и точность идентификации теплофизических характеристик, и, как следствие, математического описания теплового состояния проектируемого теплозащитного покрытия летательного аппарата. Но такой результат может быть получен только в том случае, если для решения соответствующих обратных задач используются достаточно точные экспериментальные данные о временной эволюции температуры в определенных точках исследуемого образца, данные, не имеющие существенных систематических погрешностей.

В ходе теплофизических экспериментов достаточно часто измерения температуры проводятся с помощью контактных датчиков - термопар. Поскольку показания термопар определяются их собственным тепловым состоянием, а не локальным тепловым состоянием исследуемого образца, в средах с сильной пространственной неоднородностью тепловых свойств интерпретация показаний термопар может быть затруднена. Нестационарная постановка теплового эксперимента в значительной степени усугубляет эту проблему. При таком подходе разные компоненты неоднородного материала, да и сама термопара с различной скоростью реагируют на внешнее тепловое воздействие, поэтому их температуры могут значительно отличаться. Вместе с тем тепловые эксперименты именно в нестационарной постановке позволяют подключать для решения проблемы идентификации эффективный, достаточно хорошо развитый аппарат обратных задач теплообмена.

На протяжении целого ряда лет сотрудниками тепловой лаборатории кафедры 601 МАИ создавались и продолжают совершенствоваться комплексные

экспериментально-теоретических методы исследования свойств материалов. В этих методах именно обработка результатов нестационарных тепловых экспериментов с использованием термопар позволяют получить ключевые теплофизические характеристики, которые служат основой для последующего определения целого ряда таких важных свойств материалов, которые практически не поддаются прямому экспериментальному исследованию (сложность и стоимость таких исследований неприемлемо высока).

Все изложенное выше подчеркивает исключительную важность задачи определения погрешности и контроля точности интерпретации показаний термопар при нестационарных тепловых экспериментах. Ее решение требует как создания математической модели, так и проведения дополнительных экспериментальных исследований. Данная работа посвящена созданию и обобщению методики по обработке результатов термопарных измерений в высоко- и ультрапористых теплозащитных материалах в условиях их нестационарного нагрева. В ней рассматриваются вопросы построения методов обнаружения методических погрешностей термопар и обобщению методов интерпретации их показаний для последующего исследования указанных классов теплозащитных материалов.

1.2 Основные причины возникновения погрешностей термопарных измерений в телах непрозрачных для лучистого нагрева

В ряде отечественных и зарубежных работах рассматривается вопрос влияния погрешностей термопарных измерений на достоверное определение температурного поля внутри исследуемого образца материала. В свою очередь система, предназначенная для определения температур внутри и на поверхности образца, представляет собой сложную цепь, состоящую из нескольких элементов. К таким элементам можно отнести различные соединительные провода, приборы для измерения температур, конструкционные модули, автоматизированные системы обработки данных и сами термодатчики. Достаточно количество работ

было посвящено исследованию первых двух элементов измерительной цепи, подробные описания таких исследований можно найти в книгах [10-15].

На современном этапе развития науки и техники измерительная аппаратура наряду с автоматическими системами обработки данных обладает высокой точностью и скоростью [4]. В работах [16-17] показано, что превалирующую роль в неточностях измерений температур играют термодатчики. Как известно, термопара показывает температуру своего спая T_T , а не истинную температуру окружающего материала T_{II} , в некоторых случаях разница между истинной температурой и температурой термопары может быть существенно велика. В таких случаях принято говорить, что измерение температуры выполнено с методической погрешностью термопарных измерений (МПТИ) $\Delta T = T_T - T_{II}$.

Конечно, помимо методических погрешностей существуют и неточности, обусловленные инструментальными погрешностями. Обычно можно обеспечить относительную малость этих погрешностей, однако имея в виду, что устранить их полностью невозможно.

Таким образом, существует необходимость создания инструмента математического моделирования прогнозирования и компенсации методических неточностей показаний термопарных датчиков.

В работах Елисеева В.Н., Кулакова М.В., Михалева А.М., Резника С.В., Соловова В.А., Товстонога В.А и др. показано, что температура термодатчика отличается от истинной температуры исследуемого материала из-за ряда внешних и внутренних факторов.. В этих исследованиях показано, что МПТИ это основная причина появления неточностей в измерениях температуры, на величину которой в значительной степени влияют способы установки термопары, выбор термодатчика, а так же приборы, связанные с измерением параметров. Стоит заметить, что погрешность измерения термодатчиков может изменяться с течением времени. Более подробно с этим вопросом можно ознакомиться в работах [18-22].

К числу основных факторов, влияющих на погрешности термопарных измерений можно отнести:

1. Термоэлектрическая неоднородность электродов термопар - в работах [23,24] показано, что термоэлектрическая неоднородность (ТЭН) играет важную роль в определении температуры контактными датчиками и может значительно снижать точность измерения. ТЭН возникает не в спае термопар, а в термоэлектродах, и вызвана, в основном, воздействием внешней среды, особенно при высоких темпах нагрева, что влечет за собой изменение структуры и состава используемых материалов. В проволочной термопаре типа ХА (хромель-алюмель) диаметром 3мм при ударном термическом нагреве при температуре 600°С погрешность измерений достигает 6°С. В термопаре типа НН (нихросил-нисил) диаметром 3мм при ударном нагреве при температуре 600°С погрешность измерений достигает 5°С [23]. Данные погрешности могут быть снижены благодаря дополнительным испытаниям на образцах-свидетелях, позволяющих произвести более точную градуировку термопар, а так же за счет дополнительной защиты термоэлектродов.

2. Пластическая деформация термоэлектродов – влияние таких деформаций, как кручение и растяжение, рассмотрено на примере медных и константановых термоэлектродах в работе [25]. Согласно исследованиям, проведенным в этой работе, при использовании термопар данного типа уже при температуре 100°С погрешность термопарных измерений достигает 10°С, что обусловлено пластическими деформациями константановой проволоки.

3. Химическая деформация термоэлектродов - при выборе термоэлектродов особое значение стоит уделять материалу, из которого они изготовлены, особенно для случаев высокотемпературных измерений. Химическое взаимодействие термоэлектрода со средой и материалом ведет к искажению в температурном поле. Так, например, термоэлектроды на основе молибдена, вольфрама, рения и их сплавов надежно работают в вакууме, но быстро выходят из строя в окислительной среде. Термоэлектроды на основе платины хорошо работают в окислительной среде, но быстро разрушаются в вакууме и восстановительной среде [12]. Вследствие химических деформаций возникает термоэлектрическая неоднородность термоэлектродов, на участках, где градиенты температур

достигают больших значений развивается «паразитная» термо ЭДС, и показания термопар могут искажаться на $10\div 25^{\circ}\text{C}$ и более [26]. При выборе типа термопар стоит так же учитывать, что нельзя одновременно использовать высокотемпературные термопары и для работы в условиях интенсивного нагрева и высоких температур, и для измерений на невысоких темпах нагрева с небольшим диапазоном измерения температур.

4. Погрешности, вызванные эффектами Пельтье, Томсона и Джоуля. Из строения термопары известно, что она представляет собой два провода, изготовленных из различных металлов и соединённых на одном конце («горячий спай») для измерений температуры в рабочей зоне. Другие концы термопары («холодный спай») соединяются со средствами измерения напряжений [12]. В горячем спае термопары тепло поглощается, тогда как в холодном – выделяется. Вследствие данного явления происходит поглощение тепла из образца материала, и температура исследуемого тела снижается – эффект Пельтье. При наличии температурного градиента в системе термопара-образец появляется эффект Томсона, при наличии которого термоэлектроды начинают либо поглощать либо выделять тепло, что в свою очередь так же влияет на температуру исследуемого образца. Эффект Пельтье и эффект Томсона обратимые процессы. Эффект Джоуля заключается в выделении тепла, количество которого прямо пропорционально квадрату силы тока в измерительной цепи. В результате действия первых двух эффектов термопара работает как «тепловой насос» - поглощает тепло из нагреваемого тела и отдает его окружающей среде и холодному спаю. Количество тепла, поглощаемое термодатчиком, есть величина пропорциональная силе термотока. Однако при измерении термо ЭДС было доказано [27-29], что данный ток мал, и эффекты Пельтье, Томсона и Джоуля не оказывают сколь-нибудь ощутимого влияния на показания термодатчиков.

5. Изменение сопротивления внешней цепи (сопротивление термопары и соединительных проводов) – термоэлектрический измерительный комплект представляет собой, как правило, термопары, подсоединенные специальными электродами к измерительному инструменту. При значительной протяженности

соединительных проводов температурные колебания помещения, в котором они находятся, могут вызывать сопротивления внешней цепи. В измерениях появляются погрешности, знак и величина которых не может быть определена, т.к. непрерывно проводить замер сопротивления цепи практически невозможно. Данный эффект вносит серьезные погрешности при использовании платинородий-платиновых термопар. Вследствие значительного температурного коэффициента платины и платинородия относительно небольшие изменения глубины установки термопар (отличные от градуированной глубины погружения термопары) могут вызвать заметные погрешности. Для уменьшения влияния сопротивления внешней цепи принято увеличивать сопротивление милливольтметра. Подробно данный вопрос рассмотрен в работе [30].

6. Конфигурация термоэлектродов – влияние диаметров электрода имеет определенное значение на работу и показания термодатчиков. В работе [24] для хромель-алюмелевой термопары с диаметром 0,3мм показано, что при температуре 600°C погрешность измерения термопары за счет влияния термоэлектродов равна 5°C. Данные погрешности вызваны теплооттоком по электродам термопары и могут достигать существенных значений при ударных темпах нагрева и нестационарных режимах нагрева, при испытании теплозащитных покрытий летательных аппаратов. Для уменьшения искажений температурного поля целесообразно использовать микро термопары с термоэлектродами диаметром 0,05÷0,1 мм, а также соединять термоэлектроды термопар методом сварки « в стык». Стоит отметить, что использование термопар с очень тонкими термоэлектродами в значительной степени усложняет работу с ними из-за их невысокой прочности. В частности, саму сварку термопар « в стык» и их установку в образцы.

7. Погрешности, вызванные оттоком тепла по термоэлектродам – погрешности измерения данного типа характерны для термопар, сваренных с «корольком», которые в большинстве случаев устанавливаются на поверхности образца или нагревательного элемента экспериментального модуля и могут вносить существенные изменения в температурное поле образца, данный вопрос

подробно рассмотрен в работах [31,32]. Чтобы увеличить площадь контакта спая термопары с поверхностью рекомендуется размещать термопары в изотермической области, что особенно важно при исследовании поля температур в непосредственной близости от границ образца. Размер изотермической поверхности участка термопары нужно выбирать из следующего условия $l \geq 6D$, где l – длина изотермического плеча термопары, а D – диаметр термоэлектрода термопары. При этом соотношение изотермического участка к диаметру термоэлектрода увеличивается с уменьшением теплопроводности материала исследуемого образца и для теплоизоляционных материалов с коэффициентом теплопроводности меньше 0,1 Вт/(м·К) составляет более 50 [10].

8. Рациональный выбор типа термопары – при разработке технического задания на тепловые испытания образцов с использованием термопар особое место занимает выбор класса и типа термопар. Согласно требованиям [10], рекомендованным к исполнению при выборе типа термопар, необходимо использовать термопары, чьи теплофизические характеристики (ТФХ) наиболее близки к ТФХ исследуемого материала. Степень черноты и коэффициент поглощения спая термопары должен быть максимально (по возможности) приближен к соответствующим характеристикам поверхности исследуемого образца. Стоит так же учитывать, что термопары предназначенные для высокотемпературных испытаний не стоит использовать для экспериментов с невысокими температурами и темпами нагрева, и наоборот.

9. Качество изготовления рабочего спая - качество рабочего спая напрямую зависит от способа его изготовления. Готовый спай должен удовлетворять ряду требований: место спая должно иметь прочность не меньшую, чем материал термоэлектродов; зона неоднородности термоэлектродов, которая образовывается при изготовлении спая, должна быть сведена к минимуму; спай должен сохранять все основные свойства во всем диапазоне измеряемых температур [11,15]. Так же особое внимание стоит уделять процессу градуировки термопар и правильному выбору способа градуировки, т.к. погрешности,

вызванные неточностями в измерениях эталонного образца могут привести к существенным ошибкам в штатных измерениях [30].

Из всех вышеперечисленных погрешностей самыми существенными являются погрешности, вызванные теплооттоком по термоэлектродам термопар [31]. Эти погрешности принято называть методическими [32], так как они не зависят от точности измерительной аппаратуры и условий проведения температурных исследований.

Для случаев контактного измерения температуры МПТИ обусловлены характером теплообмена между рабочим телом и теплоприемником, а так же степенью искажения температурного поля тела в процессе проведения испытания. Методические погрешности зависят от большого количества факторов, и их оценка представляет для исследователя сложную задачу, тем не менее для определенного класса эти погрешности можно определить, решив уравнение теплопроводности с соответствующими краевыми условиями [33].

1.3 Определение температурного поля в полупрозрачных материалах

Для тепловой защиты основных частей различных спускаемых аппаратов («Буран», «Space Shuttle», проекты: «Гермес», «Клипер», «Русь») в настоящее время широкое применение нашли плиточные теплозащитные покрытия радиационного типа, выполненные на основе материалов из тонких керамических волокон SiO_2 , Al_2O_3 , TaO_2 , ZrO_2 , MgO и др.

Данные материалы в теплофизике принято называть полупрозрачными, т.к. они частично прозрачны для собственного теплового излучения. В полупрозрачных твердых телах перенос тепла одновременно осуществляется радиационным (лучистым) и кондуктивным теплопереносом. Проблему переноса тепла в материалах данного класса решают при помощи теории радиационно-кондуктивного теплообмена. Расчеты поля температур и излучения главным образом необходимы для поиска оптимальных режимов существования конструкций, изготавливаемых из материалов данного класса. Подобные расчеты

позволяют оценивать такие характеристики теплозащитных конструкций как термическая прочность, термические изменения размеров, энергетический обмен и другие факторы, от которых зависят эксплуатационные характеристики изделий [34]. С примерами таких расчетов аналитическими и численными прямыми методами можно ознакомиться в работах [35,36].

Вопросу, связанному с влиянием установки термопары внутри образца полупрозрачного материала на определение температурного поля внутри образца посвящен ряд работ [16, 17, 37].

В работе [37] исследовалось влияние размеров термопар на величину методической погрешности термопарных измерений. Автор рассматривал две термопары типа хромель-алюмель диаметром 0,05 и 0,2 мм, установленные в изотермической поверхности пластины фторопласта на глубине 3мм. Величина погрешности на начальном этапе нагрева была положительной, причем погрешность термопары большего диаметра оказалась выше. По мере прогрева показания более тонкой термопары диаметром 0,05 мм были близки к истинному значению, когда для термопары диаметром 0,2 мм значения оказались ниже истинных. Перенос тепла за счет теплопроводности оказался преобладающим, погрешность определялась различием теплофизических свойств исследуемого материала и термопары. В данном случае знак погрешности был отрицательным, т.к. фторопласт обладает меньшим коэффициентом теплопроводности. В работе показано, что даже при использовании микротермопар для проведения измерений в полупрозрачных материалах величина погрешности достаточно значительна и знакопеременна. Таким образом, целесообразно в результаты измерений вводить расчетную методическую поправку. Для наглядного примера такой поправки автор ссылается на работу [38] в которой происходит опытный нагрев образца фторопласта по следующей схеме: в образце фторопласта на глубине $l=1,9; 3,9; 5,1; 6,1$ мм устанавливались четыре термопары типа хромель-алюмель диаметром 0,2мм с длиной термоэлектродов 8мм, расположенных в изотермической поверхности образца материала. Нагрев образца проводился четыре раза при помощи инфракрасного нагревателя КИ-220-1000. Во всех четырех случаях

максимальная температура нагрева образца материала не превышала температуру разложения фторопласта. Плотность падающего потока излучения была равна $25,7 \cdot 10^4$ Вт/м². Отличие температур в четырех измерениях от их среднеарифметического значения не превышало 15°К. По результатам данной работы было выявлено, что расхождение между расчётными температурами и их экспериментальными значениями достигало 200-250К. Так, в работе [37] автором показано, что для термопар, расположенных на глубине 1,9мм величина погрешности достигала порядка 70%. Для термопар, расположенных более глубоко от нагреваемой поверхности величина погрешности была меньше и достигала примерно 50%. По результатам данных исследований автор предлагает расчетную формулу методической поправки, которая может быть использована для материалов со слабо изученными оптическими свойствами.

В работах [16,17] подробно рассматривается случай установки термопары внутри прямоугольного образца частично прозрачного рассеивающего однородного материала, равномерно нагреваемого по его фронтальной поверхности радиационным тепловым потоком. Допускалось, что размеры термопары не оказывали влияния на поле излучения в образце. Уравнение переноса излучения решалось методом моментов в одномерной постановке задачи [39]. Результаты расчетов показали, что на величину МПТИ в значительной степени влияет степень черноты термопары, которая может изменяться под действием высоких температур. Так при ударном темпе нагрева уже на пятой секунде нагрева рост температуры хромель-алюмелевой термопары диаметром 0,05мм опережал истинную температуру исследуемого образца примерно на 100К. Такое искажение температуры объясняется тем, что термопара поглощает больше тепла на единицу объемной теплоемкости, чем частично прозрачный материал. С течением времени это различие уменьшается из-за более интенсивного излучения с поверхности термопары. [16,17].

1.4 Задачи исследования

Анализ работ, посвященных исследованию теплового состояния образца конкретных материалов, показал, что проблема интерпретации показаний и определения методических погрешностей термопарных измерений для них остается недостаточно изученной. В ряде случаев для упрощения подготовительной работы, ее авторы устанавливают термопары на поверхности образца, что ведет к грубым ошибкам при определении теплового состояния его внутренней области. В некоторых работах, посвященных исследованию теплового состояния образца с помощью термопар, установленных внутри материала, имеет место «заделка» термопар, которая грубо нарушает структуру материала. В результате этого показания контактных датчиков могут значительно отличаться от истинных значений температуры в образце.

С учетом вышеизложенного, для данной работы были сформулированы следующие основные задачи исследования:

1) Разработать необходимые математические методы и создать достаточно точную математическую модель для определения температурного поля внутри образца полупрозрачного материала, используемого в качестве теплозащитного покрытия ЛА, испытывающего радиационный и кондуктивный нестационарный нагрев.

2) Использовать математическую модель для контроля точности температурных испытаний, проводимых на тепло-вакуумном стенде при различных давлениях. В эксперименте необходимо реализовать программируемый режим тепловых нагрузок, в том числе имитирующий условия реального спуска в атмосфере.

3) Разработать техническое задание на проведение эксперимента по исследованию температурного поля внутри теплозащитного материала с учетом результатов, полученных с применением математической модели.

4) Экспериментально и теоретически исследовать влияние на погрешность измерений режима и темпа нагрева образца материала

5) Исследовать влияние на погрешность измерения диаметра электродов и конфигурации спая термопары. В исследовании использовать:

- термопары диаметром 0,05мм; 0,1мм; 0,2мм;

- термопары, сваренные «в стык» и с «корольком».

5) Исследовать влияние термопар на показания друг друга.

6) Провести верификацию результатов стендовых испытаний по результатам математического моделирования.

7) Разработать рекомендации по выбору места и способа установки термопар, учету их влиянию на методические погрешности и способы их компенсации.

Выводы по главе 1

1. Проведен краткий анализ текущего состояния проблемы точности при идентификации и исследовании физических свойств теплозащитных материалов и покрытий, определения источников и величины методических погрешностей термопарных измерений в непрозрачных и частично прозрачных материалах

2. Показано, что вопрос определения методических погрешностей показаний термопар в ультра - и высокопористых материалах, используемых для работы в условиях нестационарных ударных темпов нагрева, остается наиболее неизученным.

3. Сформулированы основные задачи исследования:

1) Создать математическую модель, учитывающую теплофизических характеристики исследуемого волокнистого материала, используемого в качестве теплозащитного покрытия летательного аппарата, с учетом присутствия в нем термопар и подвергаемого радиационно-кондуктивного нагреву.

2) Разработать техническое задание на проведение теплового эксперимента на тепловакуумном стенде в условиях близких, к условиям космического полета в атмосфере планеты. Создать рекомендации по способу установки термопар, неразрушающему структуру волокнистого материала

3) Определить влияние на методическую погрешность выбранных термопар таких факторов, как глубина установки термопар, конфигурация спая термопар (сварка « в стык», с «корольком»), диаметр термоэлектродов.

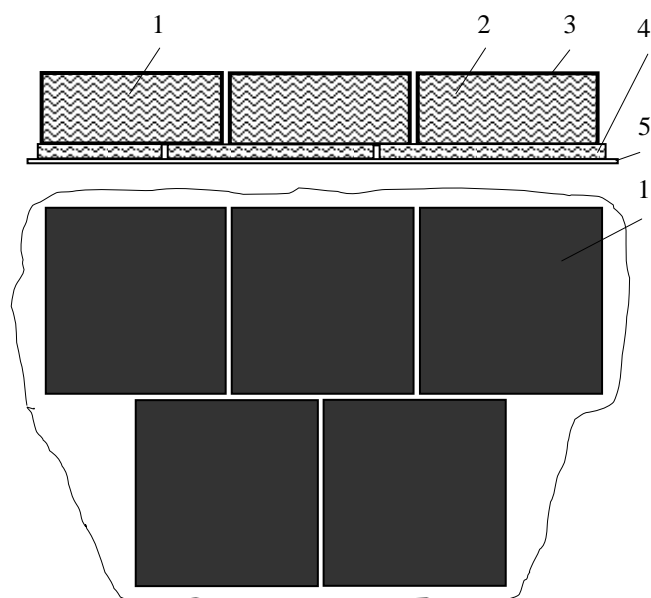
4) Провести верификацию и сравнительный анализ разработанной модели с результатами реального теплофизического эксперимента

5) По результатам проведенной работы сформулировать рекомендации к способу установки термопар, конфигурациям спая термопар и диаметру термоэлектродов с целью уменьшения погрешностей измерений.

Глава 2. Физическое моделирование процессов теплообмена в слоях тепловой защиты космических летательных аппаратов

2.3 Выбор материала

В предыдущей главе отмечалось, что актуальными и перспективными в настоящее время для тепловой защиты основной части силовых конструкций СА многоразового использования остаются плиточные теплозащитные покрытия радиационного типа на основе материалов из супертонких волокон SiO_2 , Al_2O_3 , TaO_2 , ZrO_2 , MgO и др. Такие неразрушающиеся покрытия сочетают требуемую конструктивную прочность при малом удельном весе, высокую термостойкость при высоких уровнях и градиентах температур, малую теплопроводность в широком диапазоне температур, высокую степень черноты поверхности и способность противостоять окислению. Требуемые оптические характеристики, эрозионную стойкость и защиту от атмосферной влаги волокнистого материала обеспечивает специальный внешний слой покрытия. Типовая схема такой теплозащиты представлена на рис. 2.1



- 1 – плитка, 2 – волокнистый материал,
3 – внешнее покрытие плитки,
4 – компенсирующий слой

Рис. 2.1 Схема плиточной теплозащиты

Максимальные тепловые нагрузки испытывают наветренные поверхности таких СА. При этом характеристики аэродинамического нагрева изменяются по времени и их значения существенно зависят от местоположения на поверхности ТЗП. Многоразовые СА как правило являются пилотируемыми. Для пилотируемых объектов важнейшей задачей является обеспечение безопасности экипажа на всех этапах полета, наиболее критичным из которых является этап спуска в атмосфере. Надежность работы СА на данном этапе в значительной степени определяется надежностью работы системы теплозащиты. Современные методы и средства диагностики тепловых режимов открывают возможности решения задач оперативного определения характеристик теплового нагружения теплозащитных покрытий в процессе штатной эксплуатации аппарата и использования полученной информации для предотвращения внештатных ситуаций.

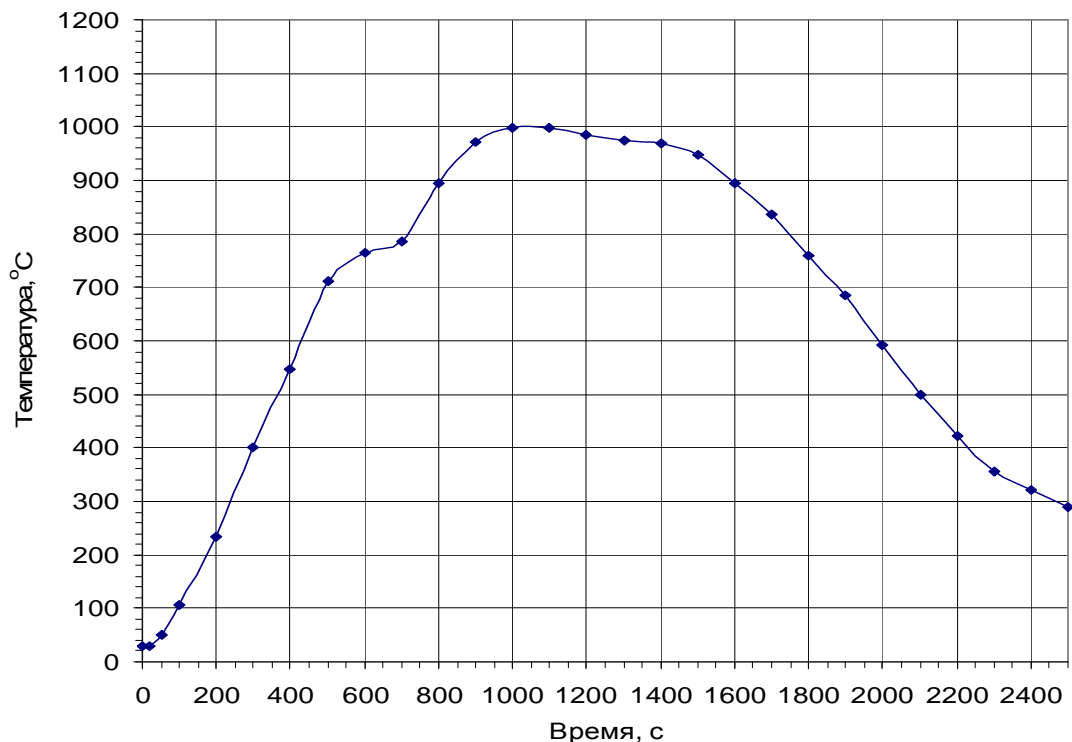


Рис. 2.2 Пример изменения температуры в одной из точек на поверхности теплозащиты ВКС «Буран»

На рис. 2.2 представлена характерная зависимость температуры от времени для одной из точек на нижней поверхности корпуса ОК «Буран» при спуске в атмосфере. На данном аппарате впервые была использована плиточная тепловая защита, разработанная на основе волокнистого материала ТЗМК-10 [40-41].

Волокнистые материалы в настоящее время достаточно хорошо изучены [42], а с ростом требований по конструктивно-компоновочным особенностям изделий ракетно-космической техники все острее встает проблема экономии массы. В первую очередь уменьшить массу изделия можно за счет снижения массы тепловой защиты летательного аппарата, отсюда возникает задача по разработке и внедрению новых материалов, которые смогли бы не уступать по характеристикам традиционным материалам, но в то же время быть легче. К таким материалам можно отнести высокопористые ячеистые материалы, выполненные на основе углеродной матрицы, которые в настоящее время широко исследуются и имеют все шансы найти свое применение в качестве теплозащитных покрытий летательных аппаратов [43].

Самым интересным для исследований из класса высокопористых углеродосодержащих материалов является сетчатый стеклоуглерод, получаемый в результате так называемой ретикуляции (устранение внутренних мембран) жестких структурных форм пенополиуритана, который в последствии пропитывается фенолоформальдегидной смолой и подвергается процессу термодеструкции [44]. Материал подобного типа обладает жестким пространственным каркасом, низкой массовой плотностью и невысокой теплопроводностью. На воздухе до температуры 700К стеклоуглерод применяют для тепло- и звукоизоляции в авиадвигателях. В вакууме он сохраняет многие свои свойства до температуры 3000К, что делает его сетчатый вариант достаточно перспективным теплозащитным материалом для ракетно-космической техники.

Для комплексного исследования теплофизических свойств сетчатых материалов, особенно плохо изученных, целесообразно разработать методологию прогнозирования свойств таких материалов, построенную по результатам комплексных исследований. Результаты ее применения могут использоваться, как

при последующем решении соответствующих обратных задач идентификации, так и для определения ТФХ без наличия экспериментальных исследований.

Разрабатываемый исследовательский комплекс предлагается апробировать сначала на хорошо изученном материале, свойства которого близки к ячеистым, чтобы иметь возможность оценить неточности, наличие которых не может быть с уверенностью исключено. В качестве такого материала было принято решение выбрать материал ТЗМК-10.

Материал ТЗМК-10 - высокопористый материал на основе ультратонкого волокна из высокочистого аморфного кварца SiO_2 - является эффективной высокотемпературной теплоизоляцией [45]. Материал разработан при создании многоразовой теплозащиты ОК «Буран»

Основные свойства исследуемого теплоизоляционного материала ТЗМК-10 представлены в таблице 2.1 (по данным ОАО "ОНПП "Технология").

Таблица 2.1 – Основные свойства материала ТЗМК-10

Характеристика	Значение
Химический состав [%]	98 ÷ 99 SiO_2
Плотность - ρ , [кг/м ³]	140 ÷ 150
Излучательная способность - ϵ	0,8 ÷ 0,9
Коэффициент теплопроводности - $\lambda(T)$ [Вт/(м °С)]	0,05 (при 20°С и P=1 бар) 0,22 (при 800°С и P=1 бар)
Теплоемкость – $C(T)$ [кДж/(кг °С)]	0,8 (при 20°С) 1,2 (при 800°С)
Предел прочности при растяжении, [МПа]	0,20 ÷ 0,35
Предел прочности при сжатии [МПа]	0,40 ÷ 0,60
Максимальная температура применения T [°С]	1100 (длительно) 1250 (кратковременно)

На рис. 2.3 представлены микрофотографии структуры материала ТЗМК-10 полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (фотографии предоставлены НПО «Молния»).

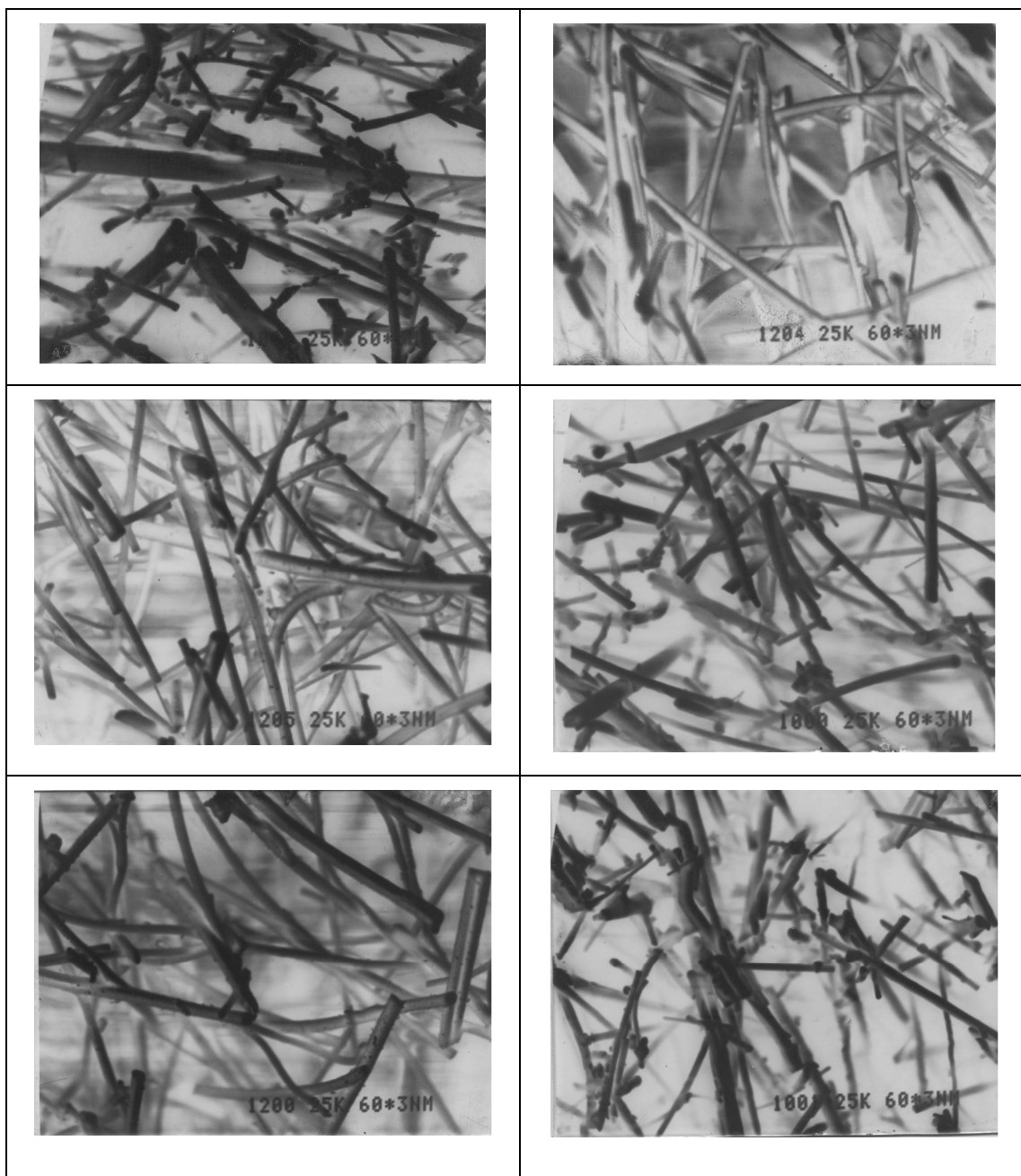


Рис. 2.3 Микрофотографии структуры материала ТЗМК-10

В таблице 2.2 и на рис. 2.4-2.5 представлены зависимости теплофизических характеристик материала ТЗМК-10 от температуры при различных значениях давления (по данным ЦАГИ). Приведенные значения коэффициента

теплопроводности соответствуют направлению перпендикулярному плоскости осаждения волокон при изготовлении материала. Теплопроводность материала в направлении параллельном плоскости осаждения волокон при его изготовлении выше теплопроводности в направлении перпендикулярном плоскости осаждения волокон [46].

Таблица 2.2 - Теплофизические характеристики материала ТЗМК-10

P, бар			$4,0 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-3}$	$4,0 \times 10^{-3}$	$1,33 \times 10^{-2}$	$1,33 \times 10^{-2}$	0,133	1,010
n	T	C	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8
	K	Дж/(кг*К)	Вт/(м К)	Вт/(м К)	Вт/(м К)	Вт/(м К)	Вт/(м К)	Вт/(м К)	Вт/(м К)	Вт/(м К)
1	173	472	0,016	0,017	0,019	0,023	0,028	0,032	0,035	0,040
2	273	693	0,021	0,022	0,024	0,029	0,035	0,042	0,044	0,048
3	373	841	0,029	0,030	0,034	0,038	0,043	0,050	0,053	0,057
4	473	950	0,043	0,044	0,048	0,055	0,061	0,068	0,071	0,074
5	573	1020	0,059	0,060	0,067	0,074	0,078	0,088	0,093	0,097
6	673	1089	0,066	0,067	0,080	0,089	0,095	0,106	0,111	0,116
7	773	1127	0,075	0,077	0,092	0,103	0,109	0,121	0,125	0,130
8	873	1151	0,081	0,083	0,100	0,116	0,122	0,135	0,142	0,150
9	973	1180	0,091	0,093	0,109	0,126	0,140	0,152	0,161	0,173
10	1073	1197	0,104	0,106	0,121	0,138	0,159	0,169	0,182	0,194
11	1173	1210	0,118	0,121	0,140	0,155	0,179	0,194	0,210	0,222
12	1273	1223	0,132	0,135	0,155	0,170	0,199	0,217	0,234	0,248
13	1373	1245	0,147	0,150	0,170	0,185	0,221	0,243	0,260	0,280
14	1473	1269	0,164	0,167	0,186	0,205	0,245	0,270	0,290	0,315
15	1573	1300	0,184	0,187	0,206	0,230	0,270	0,300	0,325	0,350

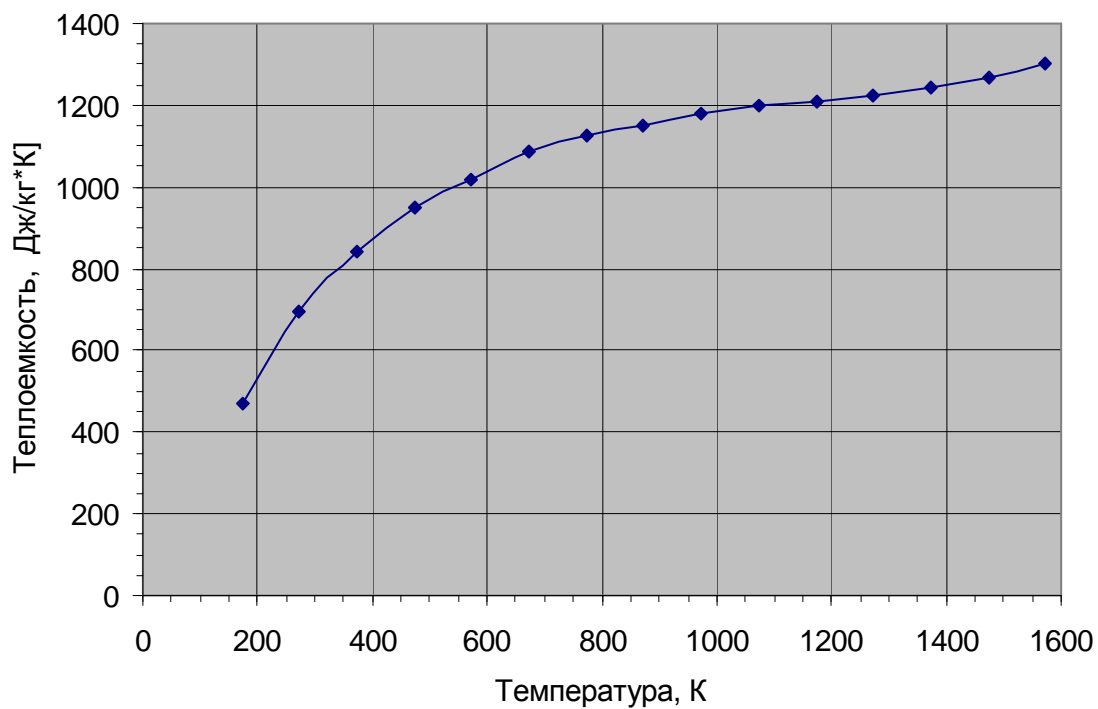


Рис. 2.4 – Теплоемкость ТЗМК-10

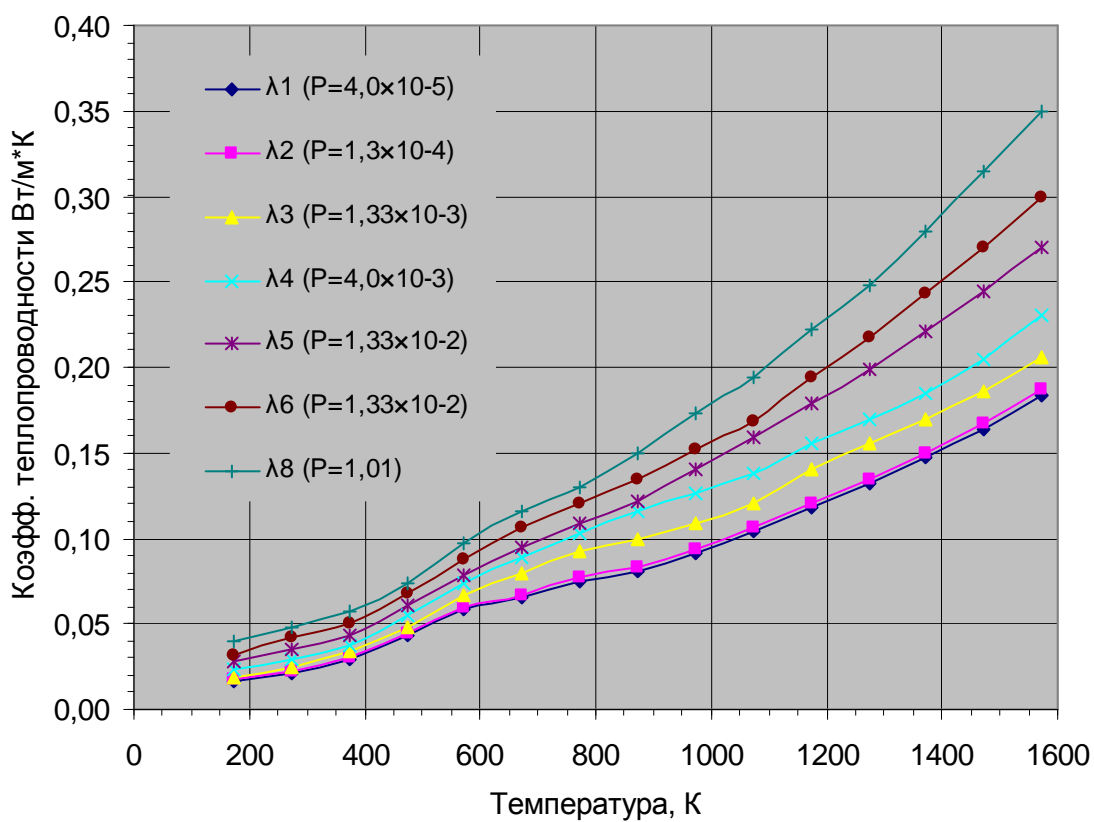


Рис. 2.5 – Коэффициент теплопроводности ТЗМК-10

Приведенные данные показывают, что теплофизические свойства исследуемого материала существенно зависят от температуры и давления окружающей среды. С ростом температуры и давления теплопроводность материала возрастает. Материал является гигроскопичным, что необходимо учитывать при проведении испытаний, поскольку наличие в материале влаги адсорбированной из воздуха существенно влияет на его теплопроводность при температурах до 100°C. Материал можно считать электроизолятором в диапазоне температур 20 ÷ 1000°C.

2.2. Геометрические размеры и форма экспериментального образца

Вопрос выбора геометрических параметров исследуемого образца материала занимает одно из ключевых мест на этапе планирования и подготовки экспериментального исследования.

Для отслеживания погрешностей измерений при дальнейшем сравнении экспериментальной и расчетной модели подразумевает создание экспериментального образца, параметры которого будут близки к параметрам реальных теплозащитных покрытий, так в разделе 2.1 было уделено внимание плиточным ТЗП, используемым на ОК «Буран». В работе [47] доказано, что вблизи лобовой поверхности космического аппарата толщина ударного слоя значительно меньше его характерных размеров, поэтому в этой области течения для решения задачи переноса излучения можно рассматривать плоский слой теплозащитного материала. Для симулирования условий космического полета было принято решение выбрать экспериментальный образец в форме прямоугольного параллелепипеда, который будет подвержен нестационарным режимам нагрева.

После выбора формы образца экспериментально исследуемого материала в целях обеспечения реализации одномерной модели прогрева рекомендуемая толщина образца для материалов с низкой теплопроводностью составляет 1/10 по отношению к другим линейным размерам. По технологическим причинам

изготовить образцы с толщиной менее 10 мм не представляется возможным из-за характеристик исследуемого материала (хрупкость, нанодисперсные частицы).

Для проведения тепловых испытаний используется тепловакуумный стенд ТВС-2М, входящий в состав экспериментального комплекса ВТС-ОЗТ Тепловой лаборатории НИО-601 МАИ [4] с экспериментальным модулем ЭМ-2Т и плоским нагревательным элементом (НЭ) из ленты термостойкой нержавеющей стали толщиной 0,1 мм (рис 2.6 – 2.7). Характеристики данного экспериментального комплекса (таблица 2.3) устанавливают ограничения на длину и ширину образца исследуемого материала, так максимально возможный размер по данным двум линейным размерам равен 15 см.

По результатам предварительного анализа было принято решение изготовить экспериментальные образцы с размерами 10*100*100 мм (толщина*длина*ширина). Для контроля за показаниями термодатчиков было принято решение провести симметричную схему нагрева двух одинаковых пластин, изготовленных из одного и того же куска материала ТЗМК-10, которые будут подвергаться двум разным нестационарным режимам нагрева.

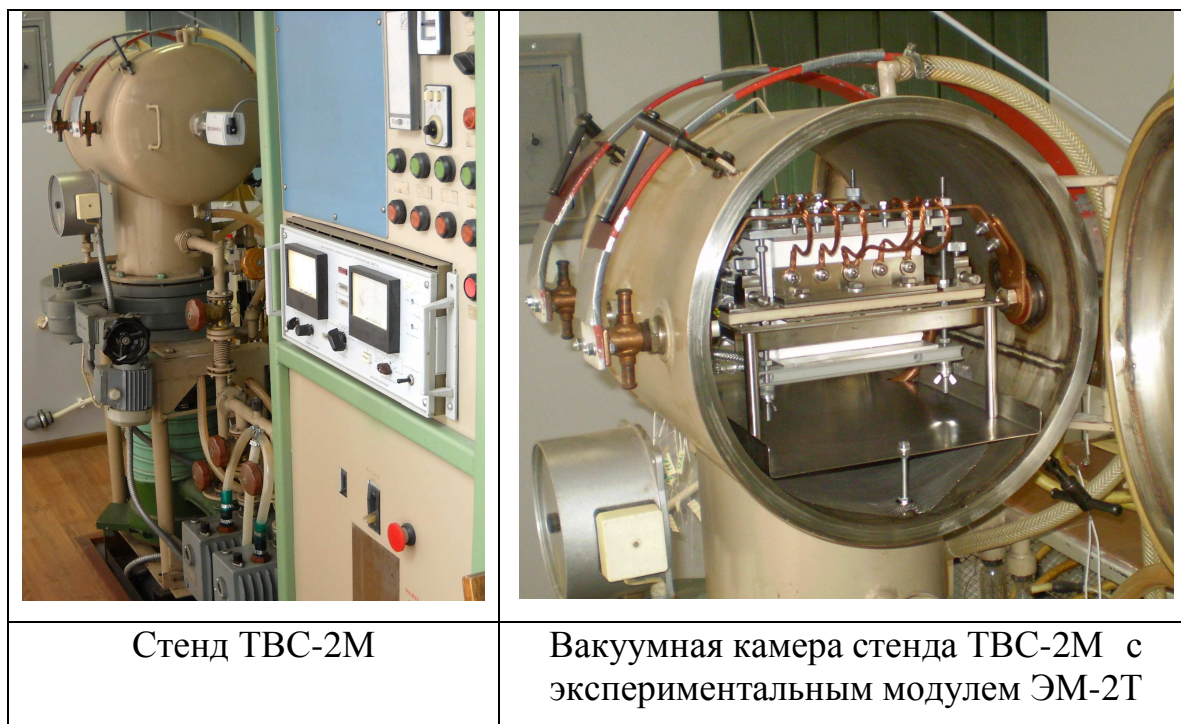


Рис. 2.6 Тепловакуумный стенд ТВС-2М



Рис. 2.7 Автоматизированная станция
экспериментального комплекса ВТС-ОЗТ

Таблица 2.3 - Основные технические характеристики стенда ТВС-2М

Объем вакуумной камеры	0,05 м ³
Мощность источников нагрева	до 40 Квт
Максимальная температура поверхности исследуемых образцов	до 2000°С*
Темп нагрева	до 100°С/с
Среда в вакуумных камерах: вакуум (в холодном состоянии); воздух, азот, инертные газы с давлением	до 1×10 ⁻⁷ бар до 1,6 бар
Размеры исследуемых образцов (длина × ширина × толщина): минимальные максимальные	10×10×(≈0) мм 150×150×100 мм
Количество одновременно испытываемых образцов	1 или 2
Общее число каналов измерения и управления АСНИ (в том числе высокоточных каналов измерения температуры)	240 112
Точность измерения температуры	0,5°С

Для моделирования условий спуска космического аппарата в атмосфере планет принято решение испытать экспериментальные образцы на двух режимах нестационарного нагрева, так как именно нестационарная постановка эксперимента позволяет получить искомые характеристики с большей точностью:

- режим №1 – нагрев образца по линейному закону ($\approx 10^\circ\text{C}/\text{сек}$ до достижения отметки в 1000°C .) на протяжении 1500 секунд;
- режим №2 – нагрев образца по программе, соответствующей темповым нагрузкам, которые испытывает точка на поверхности ОК «Буран» (рис. 2.2).

Для контроля показаний термодатчиков было предложено провести тепловые испытания на двух режимах нагрева в два этапа:

- Этап 1 – с наличием термопар разных диаметров в образце;
- Этап 2 – без наличия термопар большего диаметра.

Условия на боковых поверхностях экспериментальных образцов принимаются соответствующими условиям теплоизолированной стенки ($q=0$).

Испытания должны проводиться в вакууме при давлении $4,0 \times 10^{-5}$ бар, что обусловлено наличием известных значений ТФХ, используемого в испытаниях материала ТЗМК-10 (таблица 2.2)

На ненагреваемых (обратных) поверхностях образцов реализуются граничные условия 1-го рода. Температуры контролируются термопарами. Так же на этих поверхностях предполагается определить плотность теплового потока с помощью датчиков теплового потока с чувствительными элементами из материала ТЗМК-10

Для разработки и реализации конструктивных и технологических решений проблем, связанных с необходимостью обеспечения хорошей повторяемости условий проведения испытаний при смене схемы измерений, включая проблемы обеспечения минимизации и стабильности контактных термических сопротивлений между элементами образцов и датчиков тепловых потоков, и проблемы обеспечения повторяемости режимов нагрева, проведена необходимая технологическая НИР с использованием пробных образцов.

Выводы по главе 2

- 1.** Обоснован выбор материала для проведения экспериментального исследования, его плоская геометрия и выбор параметров образца-испытателя.
- 2.** Разработано техническое задание на проведение экспериментальных исследований образцов высокопористых волокнистых материалов на базе теплозащитного материала ТЗМК-10.
- 3.** Проведены предварительные подготовительные работы для экспериментальной отработки, налажено программное оборудование и скорректированы режимы нагрева.

Глава 3. Метод математического моделирования комбинированного теплообмена в образцах

Представленная в главе 2 физическая модель комбинированного теплообмена в слоях высокопористой теплозащиты космических летательных аппаратов, делает возможным исследование этого процесса в пределах плоского слоя теплозащитного материала, или пластины в форме прямоугольного параллелепипеда с достаточно большим отношением ее размеров в направлениях, ортогональных тепловому потоку, к размеру в продольном направлении. Расчет поля температуры подобного образца теплозащитного материала определяется на основе решения классической задачи радиационно-кондуктивного теплообмена, см., например, [48]. Накопленный опыт исследования подобных процессов в полупрозрачных теплозащитных материалах [49.] и специфика физической модели позволяют решать такую задачу в двумерной постановке (рис.3.1).

3.1 Основные уравнения задачи о комбинированном радиационно-кондуктивном теплообмене в плоской пластине

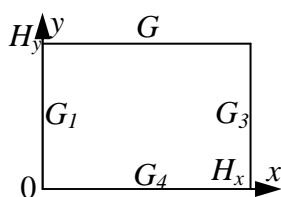


Рис.3.1 Расчетная область

$$\begin{aligned}
 C(T) \frac{\partial T}{\partial t} &= \operatorname{div}(\Lambda_c \cdot \nabla T + \mathbf{q}_r) + Q(T, \mathbf{r}, t), \quad \mathbf{r} \in (0, H_x) \times (0, H_y) \\
 -\lambda_{cx}(T, \mathbf{r}_G) \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_x(\mathbf{r}_G) T &= q_x(\mathbf{r}_G, t), \quad \mathbf{r}_G \in G_1 \cup G_3, \\
 -\lambda_{cy}(T, \mathbf{r}_G) \frac{\partial T}{\partial y} + \alpha_y(\mathbf{r}_G) T &= q_y(\mathbf{r}_G, t), \quad \mathbf{r}_G \in G_2 \cup G_4,
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\Lambda_c(T, \mathbf{r}) = \begin{pmatrix} \lambda_{cx} & 0 \\ 0 & \lambda_{cy} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{q}_r = \int_{(4\pi)} I(\mathbf{r}, \Omega, t) \Omega d\Omega,$$

В задаче (3.1) Λ_c - тензор кондуктивной теплопроводности, C - объемная теплоемкость, Q - объемный источник тепла, α_v , q_v , $v=x,y$ - коэффициент температуропроводности и плотность кондуктивного теплового потока на

границах области, \mathbf{q}_r , I – интегральные по спектру плотность радиационного потока энергии и интенсивность излучения, $\mathbf{\Omega}$ - единичный вектор направления распространения излучения, $d\mathbf{\Omega} = \sin\theta d\theta d\varphi$ - элементарный телесный угол (θ , φ - полярный и азимутальный углы сферической системы координат с полярной осью Oy , ориентированной поперек слоя материала). Начальное поле температуры считается заданным.

Коэффициенты задачи (3.1) также могут явно зависеть от пространственных переменных и времени. При этом явная зависимость коэффициентов задачи от всех своих аргументов считается заданной. Такое обобщение позволяет рассматривать слоистые композиции, разрушающиеся абляционные материалы и т.д. Поскольку исследование подобных процессов в данной работе не предусмотрено, а связанные с возможной явной пространственно-временной зависимостью коэффициентов изменения в методах решения (3.1) понятны, то зависимость коэффициентов задачи от \mathbf{r} и t не указывается там, где это не принципиально с точки зрения изложения.

3.2. Описание радиационного теплопереноса в плоском слое частично прозрачного материала

В оптически толстых слоях материалов, в которых формируется глубинный режим близкого к изотропному излучения, оценить интегральный по спектру лучистый поток энергии можно на макроуровне [50]

$$\mathbf{q}_r = -\frac{lc}{3}\nabla U, U = \int_0^\infty U_\lambda d\lambda, l = \int_0^\infty l'_\lambda \frac{dU_\lambda}{dT} d\lambda / \int_0^\infty \frac{dU_\lambda}{dT} d\lambda, \quad (3.2)$$

$$l'_\lambda = ((\alpha_\lambda + \beta_\lambda)(1 - e^{-\eta}))^{-1}, \eta = \frac{hc}{\lambda kT}, U_\lambda(\mathbf{r}, t) = c^{-1} \int_{(4\pi)} I_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{\Omega}, t) d\mathbf{\Omega}.$$

Здесь l – пробег фотонов по Росселанду, α и β – коэффициенты поглощения и рассеяния материала, $c = c_0/n$, c_0, n – скорость света в вакууме и показатель

преломления среды, в которую погружены фрагменты материала (газ в порах), λ – длина волны в вакууме, индексом λ отмечены спектральные характеристики. Предполагая локальное равновесие или слабое отклонение от него, можно использовать приближение лучистой теплопроводности, диффузное или диффузно-транспортное приближения [47, 51, 52]. Все они позволяют ввести радиационную теплопроводность и использовать для радиационного потока закон Фурье

$$\mathbf{q}_r = -\lambda_r \nabla T \quad , \quad (3.3)$$

Для равновесного излучения справедливо приближение лучистой теплопроводности, и λ_r определяется из соотношений [3]

$$\lambda_r(T) = \frac{8\pi k^4 T^2}{3c^2 h^2} \left(\int_0^{10} \frac{1}{\alpha_\lambda + \beta_\lambda} \cdot \frac{\eta^4 \cdot e^{-\eta}}{(1 - e^{-\eta})^3} d\eta + \frac{T}{ch} \int_0^{0.1} \frac{1}{\alpha_\lambda + \beta_\lambda} \cdot \frac{e^{-1/\tau}}{(1 - e^{-1/\tau})^3} \cdot \frac{1}{\tau^6} d\tau \right), \quad (3.4)$$

$$\tau = \eta^{-1}.$$

В диффузионно-транспортном приближении, которое допускает слабую анизотропию излучения, радиационная теплопроводность определяется соотношением (4), в котором коэффициент β нужно заменить на β^* – транспортный коэффициент рассеяния излучения

$$\beta^* = \beta(1 - \langle \mu \rangle) \quad (3.5)$$

где, $\langle \mu \rangle$ – показатель анизотропии рассеяния рассматриваемого материала.

Для определения этих величин, а также коэффициента поглощения, используются основанные на теории Ми статистические математические модели [3, 43, 49, 54] спектрально-оптических свойств высокопористых теплозащитных материалов.

Если фрагменты материала являются анизотропными, а их размер сопоставим с длиной волны, как в высоко- и ультрапористых теплозащитных материалах, излучение для таких длин волн может значительно отличаться от изотропного излучения. В средах, где имеют место процессы рассеяния, поведение излучения является существенно сложнее, нежели в чисто

поглощающих средах. В таком случае излучение необходимо описывать на кинетическом уровне, решая уравнение переноса излучения.

Например, в случае плоского слоя толщины H_y (рис. 3.2) мы приходим к известной интегро-дифференциальной краевой задаче [35, 47, 54].

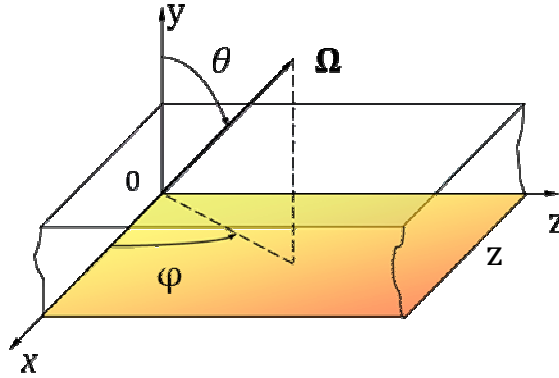


Рис. 3.2 Модель плоского слоя теплозащитного покрытия

$$\left(\mu \frac{\partial}{\partial y} + \gamma(y)\right)I(y, \mu) = \alpha(y)I_b(y) + \beta(y) \int_{-1}^1 \sigma(y, \mu, \mu_1)I(y, \mu_1) d\mu_1, \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} I(0, \mu) &= I_b(0), \quad \mu > 0, \\ I(H_y, \mu) &= I_b(H_y), \quad \mu < 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

где I – спектральная интенсивность излучения, $\alpha, \beta, \gamma = \alpha + \beta$ – локальные спектральные коэффициенты поглощения, рассеяния, ослабления соответственно,

$\sigma(y, \mu, \mu_1) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} p(y, \mathbf{\Omega} \cdot \mathbf{\Omega}_1) d\varphi d\varphi_1$ – усредненная фазовая функция, для которой

выполнено условие нормировки $\int_{(4\pi)} p(y, \mathbf{\Omega} \cdot \mathbf{\Omega}_1) d\mathbf{\Omega}_1 = 1$, $\mathbf{\Omega}$ – единичный вектор

направления, $d\mathbf{\Omega} = \sin\theta d\theta d\varphi$ – элементарный телесный угол (θ, φ – полярный и азимутальный углы сферической системы координат с полярной осью Oy , ориентированной поперек слоя), $\mu = \cos\theta$, I_b – интенсивность равновесного излучения, определяемая формулой Планка.

3.3. Численный метод решения задачи радиационно-кондуктивного теплообмена

Перед решением задача (3.1) масштабируется. Для этого используется естественная система масштабов, которая устраняет дополнительные коэффициенты, возникающие в безразмерной задаче перед компонентами уравнений. При дальнейшем решении все величины предполагаются безразмерными. Для аппроксимации уравнения энергии-теплопроводности (3.1) используем вариант известной неявной схемы с дробными шагами [8], – гибридный метод переменных направлений. Применяя (3.3) получаем

$$C_{lk}^{n+1/2} \frac{(\tilde{T}_{lk}^{n+1/2} - T_{lk}^n)}{\tau/2} = L_{xlk}^{n+1/2} + L_{yjk}^n + Q_{lk}^{n+1/2}, \quad (3.8)$$

$$C_{lk}^{n+1/2} \frac{(T_{lk}^{n+1} - \tilde{T}_{lk}^{n+1/2})}{\tau/2} = L_{xlk}^{n+1/2} + L_{yjk}^{n+1} + Q_{lk}^{n+1/2}, \quad (3.9)$$

где

$$\begin{aligned} L_{xlk}^{n+1/2} &= \frac{\lambda_x(T_{l+0.5,k}^{n+1/2})(\tilde{T}_{l+1,k}^{n+1/2} - \tilde{T}_{lk}^{n+1/2}) - \lambda_x(T_{l-0.5,k}^{n+1/2})(\tilde{T}_{l,k}^{n+1/2} - \tilde{T}_{l-1,k}^{n+1/2})}{h_x^2}, \quad T_{l\pm 0.5,k}^{n+1/2} = \frac{T_{lk}^{n+1/2} + T_{l\pm 1,k}^{n+1/2}}{2}, \\ L_{yjk}^i &= \frac{\lambda_y(T_{l,k+0.5}^{n+1/2})(T_{l,k+1}^i - T_{lk}^i) - \lambda_y(T_{l,k-0.5}^{n+1/2})(T_{lk}^i - T_{l,k-1}^i)}{h_y^2}, \quad T_{l,k\pm 0.5}^{n+1/2} = \frac{T_{lk}^{n+1/2} + T_{l,k\pm 1}^{n+1/2}}{2}, \\ C_{lk}^{n+1/2} &= C(T_{lk}^{n+1/2}), \quad Q_{lk}^{n+1/2} = Q(T_{lk}^{n+1/2}), \quad i = n \vee n+1, \end{aligned} \quad (3.10)$$

где τ , h_x , h_y - шаг метода по времени и шаги пространственной сетки соответственно, нижние индексы относятся к пространственным переменным, верхний указывает номер итерации по времени. Схема имеет 2-й порядок аппроксимации по пространственным переменным и с такой же точностью аппроксимирует по времени уравнение (3.1) на дробном временном слое $n+1/2$. Полусумма (3.8) и (3.9) имеет вид

$$C_{lk}^{n+1/2} \frac{(T_{lk}^{n+1} - T_{lk}^n)}{\tau} = L_{xlk}^{n+1/2} + \frac{1}{2}(L_{yjk}^n + L_{yjk}^{n+1}) + Q_{lk}^{n+1/2}, \quad (3.11)$$

где все коэффициенты уравнения рассчитываются по полю температуры $T_{lk}^{n+1/2}$. Поэтому такое поле температуры предварительно рассчитывается. Для

этого будем использовать следующую неявную схему типа предиктор-корректор с дополнительным шагом $n+1/4$

$$C(T_{lk}^n) \frac{(\tilde{T}_{lk}^{n+1/4} - T_{lk}^n)}{\tau/4} = \frac{\lambda_x(T_{l+0.5,k}^n)(\tilde{T}_{l+1,k}^{n+1/4} - \tilde{T}_{lk}^{n+1/4}) - \lambda_x(T_{l-0.5,k}^n)(\tilde{T}_{l,k}^{n+1/4} - \tilde{T}_{l-1,k}^{n+1/4})}{h_x^2} +$$

$$+ \frac{\lambda_y(T_{l,k+0.5}^n)(T_{l,k+1}^n - T_{lk}^n) - \lambda_y(T_{l,k-0.5}^n)(T_{l,k}^n - T_{l,k-1}^n)}{h_y^2} + Q(T_{lk}^n), \quad (3.12)$$

$$C(\tilde{T}_{lk}^{n+1/4}) \frac{(T_{lk}^{n+1/2} - T_{lk}^n)}{\tau/2} = \frac{\lambda_x(\tilde{T}_{l+0.5,k}^{n+1/4})(\tilde{T}_{l+1,k}^{n+1/4} - \tilde{T}_{lk}^{n+1/4}) - \lambda_x(\tilde{T}_{l-0.5,k}^{n+1/4})(\tilde{T}_{lk}^{n+1/4} - \tilde{T}_{l-1,k}^{n+1/4})}{h_x^2} +$$

$$+ \frac{[\lambda_y(\tilde{T}_{l,k+0.5}^{n+1/4})(\hat{T}_{l,k+1}^{n+1/4} - \hat{T}_{lk}^{n+1/4}) - \lambda_y(\tilde{T}_{l,k-0.5}^{n+1/4})(\hat{T}_{lk}^{n+1/4} - \hat{T}_{l,k-1}^{n+1/4})]}{h_y^2} + Q(\tilde{T}_{lk}^{n+1/4}), \quad \hat{T}_{lk}^{n+1/4} = \frac{T_{lk}^{n+1/2} + T_{lk}^n}{2}. \quad (3.13)$$

Стоит отметить, что в приведенных выше соотношениях, волной отмечены значения температуры, которые, строго говоря, нельзя соотнести с временным слоем, определяемым по ее верхнему индексу. Это связано с тем, что при получении этих значений используются дифференциальные операторы по различным пространственным переменным, относящиеся к различным временным слоям.

Пространственные производные в граничных условиях (3.1) аппроксимируются на каждом шаге метода неявно и односторонним образом и также с точностью второго порядка. Например,

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{1,k} = \frac{-3T_{1,k} + 4T_{2,k} - T_{3,k}}{2h_x} + O(h_x^3), \quad \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{N_x,k} = \frac{3T_{N_x,k} - 4T_{N_x-1,k} + T_{N_x-2,k}}{2h_x} + O(h_x^3), \quad (3.14)$$

где N_x - число узлов сетки по координате x . Полученные на всех стадиях решения трехдиагональные системы уравнений решаются скалярной прогонкой. Для реализации численного метода и решения задачи по определению температурного поля внутри образца частично прозрачного материала в рабочей среде MATLAB был разработан соответствующий программный инструмент.

3.4 Проверка численного метода на точных аналитических решениях

Для проверки численного алгоритма и результатов математического моделирования проводилось сравнение результатов расчета с известными различными аналитическими решениями одномерных краевых задач. Так, на рис. 3.3 представлено поле относительной погрешности

$$\delta_r = (T - T_{\text{точ}}) / T_{\text{точ}} = \delta / T_{\text{точ}}$$

решения методом (3.8)-(3.10), (3.12)-(3.14) начально-краевой задачи

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad -l < x < l, \quad ,$$

$$T(x, 0) = 0, \quad T(-l, t) = T(l, t) = kt,$$

имеющей аналитическое решение [55, С.106-109]:

$$T_{\text{точ}} = kt + \frac{k(x^2 - l^2)}{2\chi} + \frac{16kl^2}{\chi\pi^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^3} \exp\left[-\frac{\chi(2n+1)^2\pi^2 t}{4l^2}\right] \cos\frac{(2n+1)\pi x}{2l}, \quad (3.15)$$

где l - половина длины моделируемой области по оси Ox равная 15мм в размерном виде; k - параметр граничных условий, зависящий от режима нагрева, χ - коэффициент температуропроводности.

Эта погрешность получена при подстановке в задачу осредненных характеристик материала ТЗМК-10, на той же безразмерной пространственно-временной сетке и при том же количестве шагов по времени, которые применялись при решении общей задачи (3.1). Из рис. 3.3 следует, что относительная погрешность метода в конце вычислений не превышает 0.6% . Необходимо также отметить, что это максимальное значение погрешность достигается в точках минимума точного решения (см. рис.3.4)

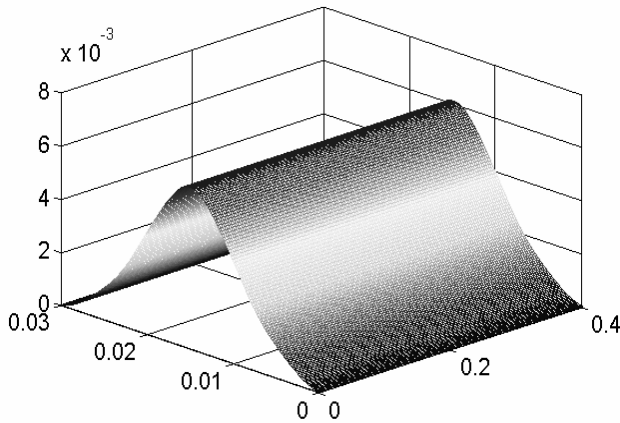


Рис.3.3 Поле относительной погрешности δ_r в конце расчета.

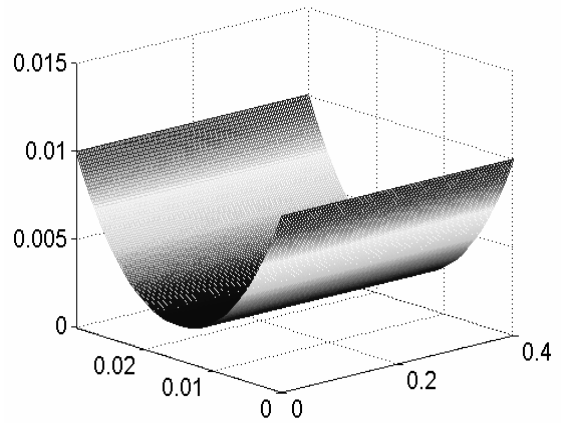


Рис.3.4 Точное решение (3.15).

На рис. 3.5 показан характер изменения относительной погрешности для результатов моделирования и аналитического решения в зависимости от номера итерации. Сравнительно большие начальные значения относительной погрешности δ_r связаны с тем, что в программе моделирования использовано начальное не нулевое значение, которое для моделируемого реального теплового поля является недостижимым (поэтому критерий останова программы был построен с учетом такого ограничения), а значение 10^{-7} . Когда модельная система "забывает" начальное условие (эргодичность), аналитическое и численное решения становятся доступными для сравнения, относительная погрешность входит в 3-процентную "трубку" и начинает монотонно убывать. При этом накопленная абсолютная погрешность в численном методе ограничена сверху и крайне незначительна, о чем говорит поведение δ (рис.3.6).

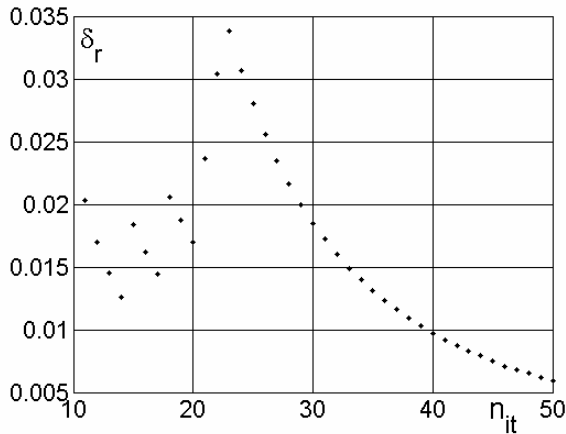


Рис.3.5 Зависимость относительной погрешности численного метода δ_r от номера итерации

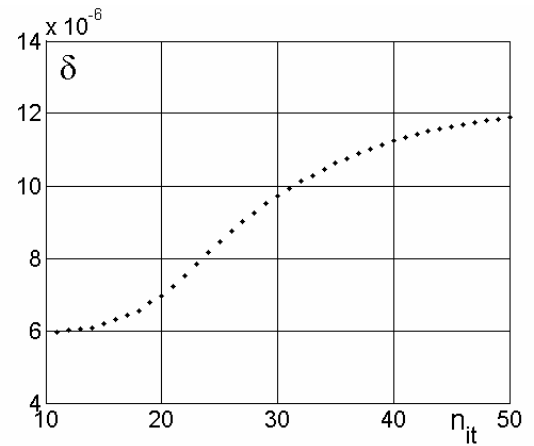


Рис. 3.6 Зависимость от номера итерации абсолютной погрешности δ численного метода

Результаты, приведенные выше, подтверждают надежность, достаточно высокую точность численного метода и возможность его применения для верификации данных полученных альтернативными, в том числе и экспериментальными, методами.

3.5. Численный метод решения кинетической задачи переноса излучения

Для задач, подобных (3.6)-(3.7) существуют различные методы их численного решения. Такие методы как методы Монте-Карло, экстремальные методы или «ray tracing» (метод трассировки лучей) методы - являются достаточно трудоемкими и имеют ряд особенностей, влияющих на их практическую реализацию. В рамках данной работы эти методы не рассматривались, как и полуаналитические методы, использующие различные аппроксимации для интенсивности излучения (методы моментов, сферических гармоник и др.).

Задачу (3.6)-(3.7) можно достаточно просто решить, если ввести «фиктивное» время и получить стационарное решение при установлении решения нестационарной задачи, которое в свою очередь получается сеточным методом дискретных ординат (МДО). Однако использование устойчивых сеточных неявных аппроксимаций в уравнениях с интегральным оператором приводит к

линейным системам большой размерности. Явные и экономичные варианты МДО трудно сделать устойчивыми. В работах [53, 56] показано также, что сильное рассеивание в среде (коэффициенты поглощения и рассеяния отличаются на 3 порядка) усугубляет эту проблему, делая одно- и двух шаговые методы неустойчивыми. Данную проблему можно устранить, используя трехшаговый метод расщепления «по физическим процессам». В первую очередь делается «дробный» шаг «конвекции», исключительно обрабатывающий жесткую компоненту уравнения (3.6). На этом шаге используется схема «дифференцирование против потока», формируется условие устойчивости, определяющее шаг метода по времени, и учитываются пространственные граничные условия.

Для реализации метода установления при решении задачи (3.6)-(3.7) введем «фиктивное» время, используя естественную систему масштабов

$$M_\gamma = M_\alpha = M_\beta = M_y^{-1} = a\gamma_{\max}, cM_t M_\gamma / n_{ef} = 1, a \in (0,1). \quad (3.16)$$

В результате мы приходим к уравнению:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mu \frac{\partial}{\partial y} + \gamma(z)\right) I(y, \mu) = \alpha(y) I_b(y) + \beta(y) \int_{-1}^1 \sigma(y, \mu, \mu_1) I(y, \mu_1) d\mu_1, \quad (3.17)$$

в котором для безразмерных величин использованы те же обозначения, что и для соответствующих размерных. При указанном способе масштабирования в (3.17) не будет чрезмерно больших значений оптических коэффициентов. Выбор постоянной a в (3.16) следует провести так, чтобы диапазон изменения безразмерной переменной y также был бы не слишком большим. В противном случае придется работать с сетками, имеющими по y слишком большое количество узлов. Для построения консервативного метода приведем уравнение к дивергентной форме (W - потенциальная функция):

$$\frac{\partial}{\partial t} I(y, \mu, t) + \frac{\partial}{\partial y} [V_y(y, \mu, t) I(y, \mu, t)] = 0, \quad V_y(y, \mu, t) = \mu + W(y, \mu, t) I^{-1}(y, \mu, t),$$

$$W(y, \mu, t) = \int_y^0 f(y_1, \mu, t) dy_1, \mu > 0, \quad W(y, \mu, t) = \int_y^d f(y_1, \mu, t) dy_1, \mu < 0 \quad (3.18)$$

$$f(y, \mu, t) = \alpha(y) I_b(y) - \gamma(y) I(y, \mu, t) + \beta(y) \int_{-1}^1 \sigma(y, \mu, \mu_1) I(y, \mu_1, t) d\mu_1$$

Для аппроксимации уравнения (3.18) используем схему «дифференцирования против потока» [57]. Эта схема достаточно проста, консервативна, условно устойчива и имеет первый порядок точности аппроксимации, что приводит к появлению численной диффузии. Снизить ее влияние на качество решения можно, например, введением дополнительного шага, реализующего транспортный метод коррекции потоков FCT (Flux Corrected Transport) [58,59]. Такой прием незначительно увеличивает объем вычислений и повышает порядок аппроксимации по Δy уравнения (3.18) до второго. Можно реализовать также схему [60].

Наиболее серьезные проблемы при использовании схемы [57] возникают вблизи резких изменения интенсивности и областей, в которых значения интенсивности относительно близки к нулю. Это существенно увеличивает эффективные сеточные «скорости» V_y , что приводит к уменьшению шага по времени в методе до недопустимо малых значений.

Кроме того, на устойчивость метода может оказывать влияние интегральный характер потенциальной функции (3.18). Поэтому проведем более детальное исследование этой аппроксимации. Для простоты рассмотрим случай однородной среды $\alpha, \sigma \equiv 0, \gamma = const$ и положим для определенности $\mu > 0$. Поскольку в рассматриваемом случае эффективные скорости положительны, аппроксимация (3.18) принимает вид:

$$I_{k,j}^{n+1} = I_{k,j}^n + \frac{\Delta t}{\Delta z} \left[\frac{\mu_j}{\gamma} (I_{k-1,j}^n - I_{k,j}^n) - \int_{\Delta z^{(k-2)}}^{\Delta z^{(k-1)}} I_{j}^n(z) dz \right] + o(\Delta t^2, \Delta z^2)$$

$$\rho_{k,j}^n \equiv \rho(z_k, \mu_j, t_n), \quad t_n = t_{n-1} + \Delta t_n, \quad n \geq 1, \quad t_0 = 0, \quad \Delta t_n < \Delta z / \max_{k,j} |V_{k,j}^{n-1}|,$$

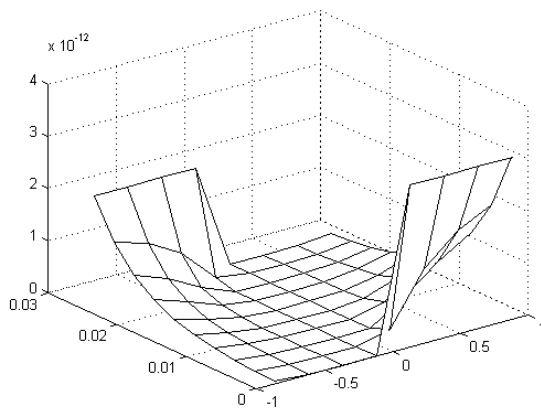
$$\mu_j = \cos((j - 0.5)\pi / n_\mu), \quad j = 1 \dots n_\mu, \quad n_\mu = 2m, \quad z_k = (k - 1)\Delta z, \quad \Delta z = d / (n_z - 1),$$

откуда после преобразований и снятия у функций верхних и нижних сеточных индексов получаем:

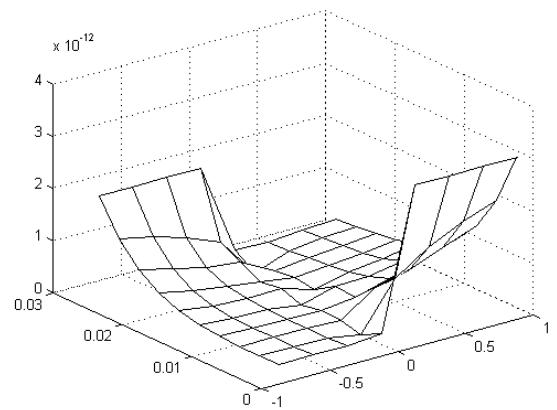
$$\frac{\partial I_v}{\partial t} + \left(\frac{\mu}{\gamma} - \frac{\Delta y}{2} \right) \frac{\partial I_v}{\partial y} + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial^2 I_v}{\partial t^2} + o(\Delta t^2) = \frac{\mu \Delta y}{2\gamma} \frac{\partial^2 I_v}{\partial y^2} - I_v + o(\Delta y^2), \mu > 0. \quad (3.19)$$

По сравнению с уравнениями (3.18) в аппроксимирующем уравнении (3.19) в членах первого порядка малости по шагам сетки прослеживаются три дополнительных эффекта:

1. Изменяется скорость эффективной «конвекции», причем это изменение может быть весьма существенным при достаточно больших γ .
2. Появляется дополнительный «диффузионный» член, степень влияния которого на решение увеличивается с уменьшением γ и увеличением μ (неустойчивости развиваются из областей с сильным рассеиванием и малыми μ).
3. Появляются дополнительные волновые возмущения решения, среди которых *всегда* содержатся неустойчивые компоненты (рис. 3.7)



(a)



(б)

Рис. 3.7 (а) - точное решение задачи (3.6), (б) - промежуточное численное решение (3.18): $d=0.03$, $\alpha=\sigma=0$, $\gamma=130$, $n_y \times n_\mu=10 \times 8$, $T \in [800, 1200]^\circ\text{C}$.

Причиной такого неустойчивого поведения схемы [57] в области ее «традиционной устойчивости», которая определяется условием Куранта, является наличие малого коэффициента μ перед пространственной производной интенсивности. Уравнения с такой структурой обычно «плохо себя ведут» при

численном решении, и для повышения устойчивости вычислительной процедуры необходимо принимать специальные меры. Проблемы возникают при неявной аппроксимации уравнений с интегральным оператором. Вместе с тем снизить их влияние можно, если использовать расщепление оператора задачи и пойти по пути построения многошагового алгоритма [61,62].

3.5.1 Двухшаговая схема «предиктор-корректор»

Запишем уравнение (3.6) в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial t} + L_1 I &= \alpha I_b + L_2 I, \quad L_1 I(y, \mu, t) = \left(\mu \frac{\partial}{\partial y} + \gamma(y) \right) I(y, \mu, t), \\ L_2 I(y, \mu, t) &= \beta(y) \int_{-1}^1 \sigma(y, \mu, \mu_1) I(y, \mu_1, t) d\mu_1 \end{aligned}, \quad (3.20)$$

и используем следующую схему «предиктор-корректор»

$$\frac{I^{n+1/2} - I^n}{\tau} + L_1 I^{n+1/2} = \alpha I_b, \quad \frac{I^{n+1} - I^{n+1/2}}{\tau} = L_2 I^{n+1}, \quad (3.21)$$

которая неявна на каждом «дробном» шаге. Однако, схема (3.21) аппроксимирует уравнение (3.20) явно и с первым порядком точности по τ . Исследуем метод (3.21) более детально.

3.5.1.1. Анализ работы «предиктора»

Первое из уравнений (3.21) можно решить точно, получаем:

$$\begin{aligned} I^{n+1/2}(y, \mu) &= I_b(0) e^{-\int_0^y f(y_1, \mu) dy_1} + \int_0^y dy_1 g(y_1, \mu) e^{-\int_{y_1}^y f(y_2, \mu) dy_2}, \quad \mu > 0, \\ I^{n+1/2}(y, \mu) &= I_b(d) e^{\int_y^d f(y_1, \mu) dy_1} - \int_y^d dy_1 g(y_1, \mu) e^{\int_y^{y_1} f(y_2, \mu) dy_2}, \quad \mu < 0, \quad (3.22) \\ f(y, \mu) &= \frac{1}{\tau \mu} (1 + \tau \gamma(y)), \quad g(y, \mu) = \frac{1}{\tau \mu} (I^n + \tau \alpha I_b). \end{aligned}$$

Заметим, что знаки функций $f(y, \mu)$ и $g(y, \mu)$ всегда совпадают со знаком μ , поэтому в показателях экспонент, входящих в (3.22) всегда стоят отрицательные значения. При малых τ , μ функции $f(y, \mu)$ и $g(y, \mu)$ гиперболически возрастают, поэтому возникает вопрос по поводу ограниченности (3.22). Выполнение условия непрерывности

$$I^{n+1/2} \rightarrow I^n, \quad \tau \rightarrow 0, \quad (3.23)$$

содержит ответ на вопрос об ограниченности. Исследуем вопрос ограниченности решений (3.22), предполагая слой оптически однородным, т.е. полагая $\alpha, \gamma = const$, и опуская несущественную в преобразованиях зависимость от μ . Поскольку

$$\frac{1}{\tau\mu} \int_0^y dy_1 \rho(y_1, \tau) e^{-\frac{(1+\gamma)y-y_1}{\tau} \frac{1}{\mu}} \equiv \frac{1}{1+\tau\gamma} \int_0^{\frac{y}{\mu}(1+\gamma)} \rho\left(y - \mu \frac{u\tau}{1+\tau\gamma}, \tau\right) e^{-u} du \xrightarrow{\tau \rightarrow 0, \mu > 0} \rho(y, 0),$$

то отсюда при $\rho(y, \tau) = I^n(y) + \tau\alpha I_b(y)$ следует (3.23).

Нетрудно убедиться в справедливости соотношения

$$I^{n+1/2}(y, \mu) \rightarrow I_b(0) e^{-\frac{\gamma y}{\mu}} + \frac{\alpha}{\mu} \int_0^y dy_1 I_b(y_1) e^{-\frac{\gamma(y-y_1)}{\mu}}, \quad \tau \rightarrow \infty, \quad \mu > 0,$$

в правой части которого стоит решение уравнения (3.6) для однородной нерассеивающей среды. Аналогичные соотношения выполняются и для $\mu < 0$. Также нетрудно обобщить эти предельные соотношения на случай неоднородной среды.

Как видим, в аналитической реализации шаг «предиктор» схемы (3.21) работает совершенно нормально и приводит к необходимым предельным следствиям. Вместе с тем компьютерная реализация соотношений (3.22) сопряжена с существенными проблемами.

На рис.3.8 показаны результаты воздействия шага-предиктора на равновесное состояние при $\tau=0.1$ и $\tau=1$ и для того же набора параметров задачи, что и у соответствующего рис.3.7 Численное интегрирование проводилось по методу Ромберга с различной точностью, порядок главного члена погрешности k_R показан на рисунках. Как видно из рисунков, на шаге «предиктор» появляются

значительные вычислительные ошибки интегрирования, которые возникают и распространяются из области малых μ . Устранить их можно, только повышая точность интегрирования.

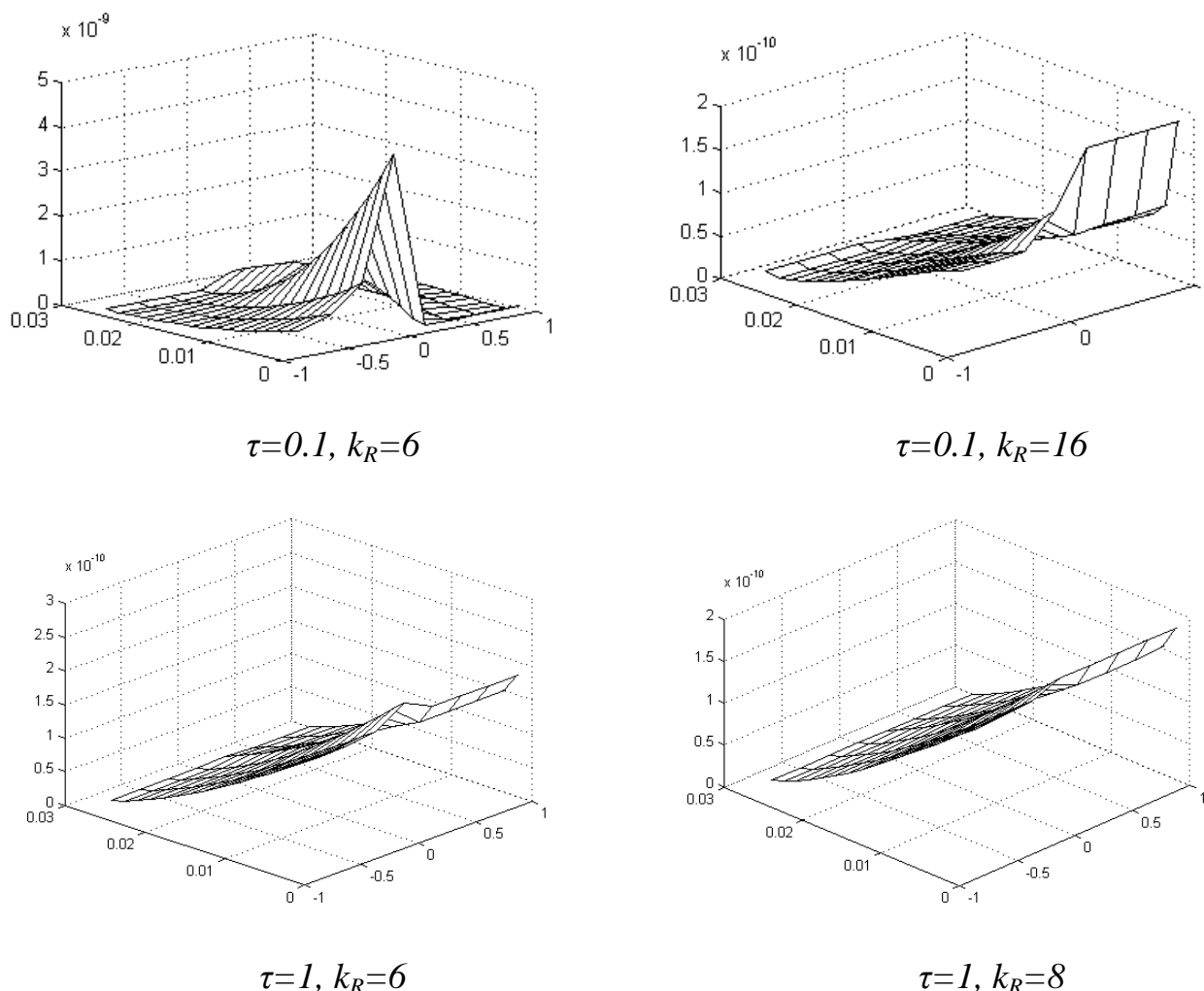


Рис. 3.8 Воздействие на равновесную интенсивность излучения «предиктора» схемы (3.21) для разной точности интегрирования при $d=0.03, \alpha=\sigma=0, \gamma=130, n_z \times n_\mu=10 \times 8, T \in [800, 1200]^\circ\text{C}$.

При малых τ требования по точности становятся высокими на столько, что возможность практического использования метода исключается. Из-за существующих погрешностей интегрирования при малых τ, μ на шаге «предиктор» схемы (3.21) нарушается условие непрерывности (3.23).

При $\tau\mu \sim 1$ и выше такие проблемы не возникают, или относительно легко устранимы. Однако условие $\tau\mu > 1$ приводит к значениям τ настолько большим, что это нарушает аппроксимацию уравнения (3.6) схемой (3.21). На этом проблемы, возникающие в двух шаговом методе, не ограничиваются.

3.5.1.2 Анализ работы «корректора»

Уравнение шага «корректор» схемы (3.21) имеет вид

$$I^{n+1}(y, \mu) = I^{n+1/2}(y, \mu) + \tau\beta(y) \int_{-1}^1 \sigma(y, \mu, \mu_1) I_v^{n+1}(y, \mu_1) d\mu_1 . \quad (3.24)$$

Для его решения используем следующий итерационный процесс

$$I^{n+1,p+1}(y, \mu) = I^{n+1/2}(y, \mu) + \tau\beta(y) \int_{-1}^1 \sigma(y, \mu, \mu_1) I^{n+1,p}(y, \mu_1) d\mu_1, \quad p = 0, 1, \dots, \quad (3.25)$$

$$I^{n+1,0}(y, \mu) = I_v^{n+1/2}(y, \mu) .$$

Сходимость итераций шага-корректора (3.25) имеет место лишь при малых временных шагах, подчиняющихся условию $\tau\beta_{\max} < 1$, поскольку

$$\|\delta^{p+1}\| \equiv \max_{y, \mu} |I_v^{n+1,p+1} - I_v^{n+1,p}| \leq \tau \max_y \beta(y) \int_{-1}^1 \sigma(y, \mu, \mu_1) \|\delta^p\| d\mu_1 = \tau\beta_{\max} \|\delta^p\| .$$

Основная проблема двух шагового метода (3.21) состоит в существовании противоречивых условий: $\tau\mu > 1$ для «предиктора», и $\tau\beta_{\max} < 1$ для «корректора». С усилением эффектов рассеивания эти условия становятся несовместимыми.

В случае явного «предиктора» мы сталкиваемся на этом шаге решения с проблемами неустранимых неустойчивостей.

Относительно просто проблему противоречивых условий можно решить при правильной организации «дробных» шагов.

3.5.2 Трехшаговое расщепление «по физическим процессам»

Результаты, полученные в разделах 3.5.1.1 и 3.5.1.2, показывают, что проблемы численного решения уравнения (3.6) связаны в первую очередь с наличием малого коэффициента перед пространственной производной. Они возникают, когда жесткая компонента уравнения (3.6) включена в какое-либо из уравнений для «дробных шагов» наряду с другими компонентами исходного уравнения (за исключением, возможно, производной по времени). Поэтому предлагается следующий алгоритм расщепления по «физическим процессам»:

1. В первую очередь делается «дробный» шаг «конвекции», обрабатывающий только жесткую компоненту уравнения (3.6). На этом шаге используется схема «дифференцирование против потока», формируется условие устойчивости, определяющее шаг метода по времени, и учитываются пространственные граничные условия.

$$I^{n+1/3}(y, \mu) - I^n(y, \mu) + \tau \frac{\partial}{\partial y} (\mu I^n(y, \mu)) = 0, \quad \tau < \Delta y / \max \mu_j \quad (3.26)$$

Стоит заметить, что если следующий шаг подобного явного алгоритма будет учитывать остальные неинтегральные компоненты уравнения (3.6), т.е. будет связан с учетом физических процессов ослабления излучения и вторичного излучения после поглощения, то в результате возникает двух шаговый в целом алгоритм, первый шаг которого подобен (3.21).

2. Поэтому на втором шаге нужно учитывать действие интегральной компоненты уравнения (3.6), связывая этот шаг с процессом своеобразного «перемешивания» излучения, порождаемым рассеянием:

$$I^{n+2/3}(y, \mu) = I^{n+1/3}(y, \mu) + \tau \beta(y) \int_{-1}^1 \sigma(y, \mu, \mu_1) I^{n+1/3}(y, \mu_1) d\mu_1, \quad (3.27)$$

3. Шаг учета эффектов вторичного излучения и ослабления:

$$I_v^{n+1}(y, \mu) = I_v^{n+2/3}(y, \mu) + \tau(\alpha(y)I_{bv}(y) - \gamma(y)I_v^{n+2/3}(y, \mu)) . \quad (3.28)$$

Практическое применение показывает простоту и эффективность указанного метода. Итерации (3.26)-(3.28) сходятся при выполнении условия устойчивости (3.26). Сходимость метода практически не зависит от выбора начального состояния, как и структура стационарного решения, которое, как это и должно быть для подобных физических систем, является состоянием аттрактором, зависящим лишь от параметров задачи. Естественно, в подобных расчетах должен также осуществляться непрерывный контроль за невязкой стационарного уравнения в узлах разностной сетки. Для описанного выше метода также написана программа в рабочей среде MATLAB. Сходимость метода и высокое качество решения даже при сравнительно «грубых» начальных приближениях демонстрируют рис.2.13 и 2.14.

В заключение стоит отметить, что решение кинетического уравнения в полном виде, безусловно, создает возможность для контроля корректности разного рода аналитических приближений в теории переноса излучения: диффузионного (формулы 3.2-3) [50], (формула 3.4) [47], диффузионно-транспортного (формула 3.4) [51, 52], метода моментов [39] и др.

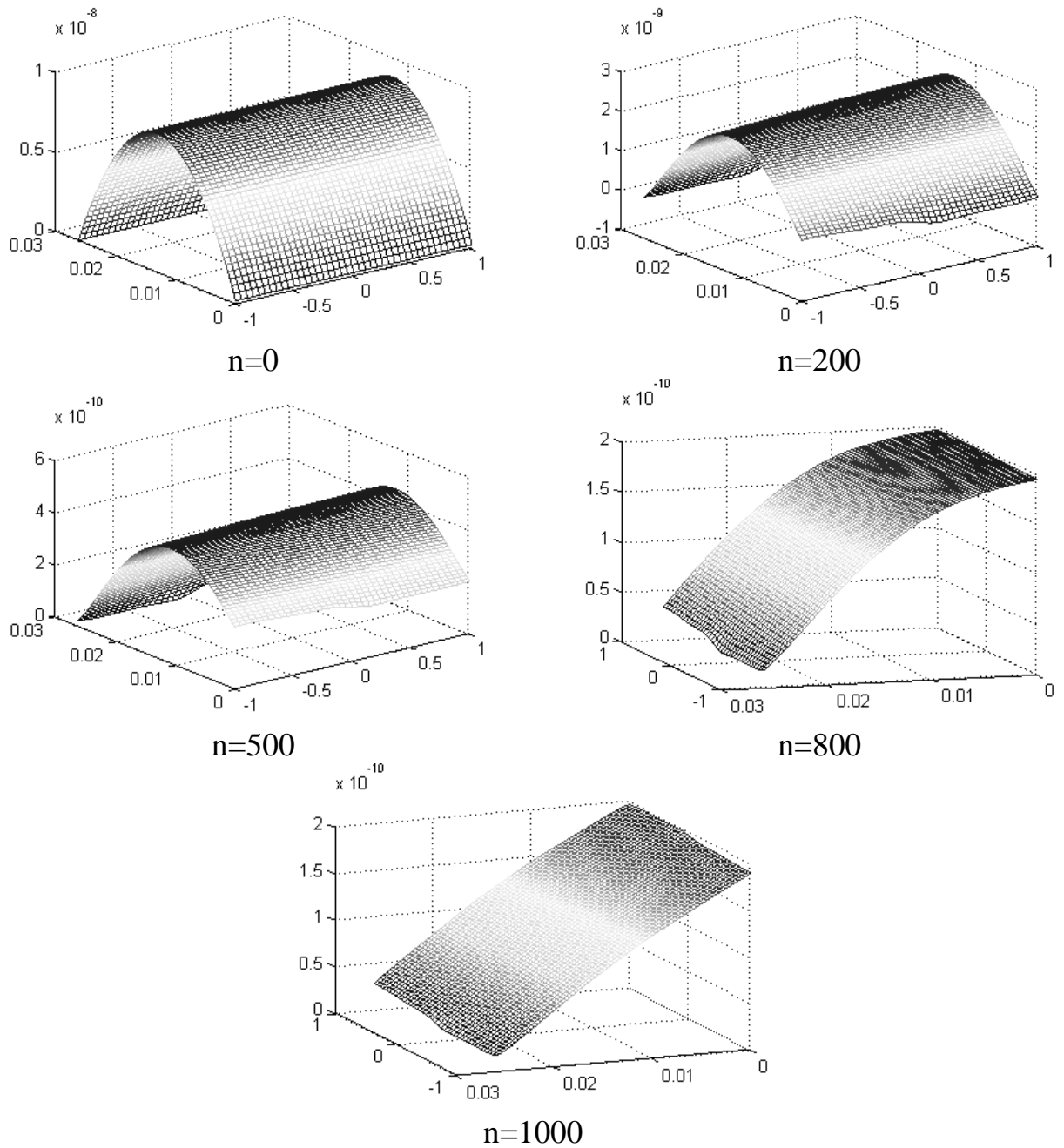


Рис.3.9 Эволюция интенсивности излучения в слое высокопористого материала толщиной 30 мм.

Начальное условие – параболическое («грубое» начальное приближение).

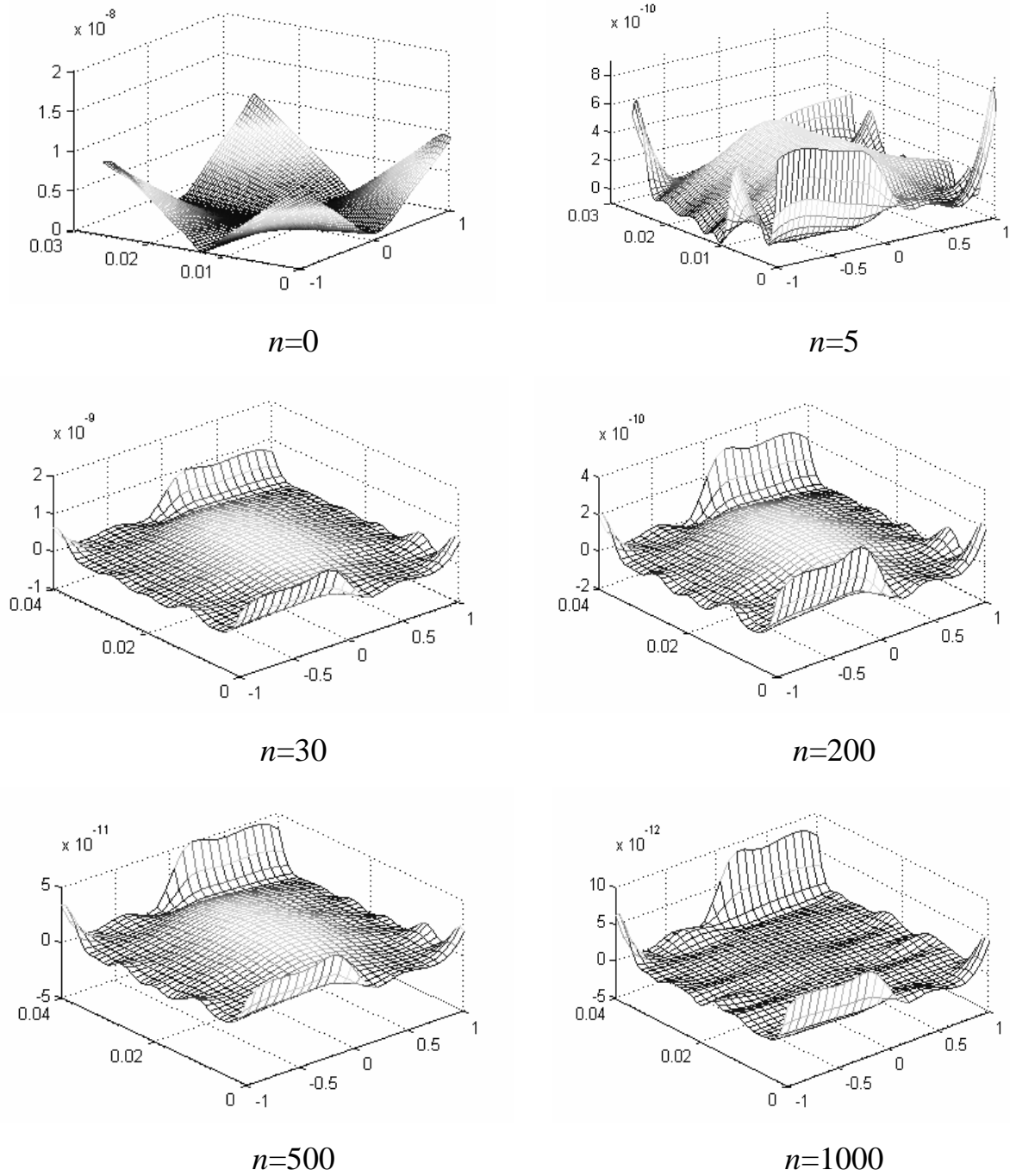


Рис.3.10 Эволюция невязки при решении уравнения переноса излучения (3.6)

в слое высокопористого материала толщиной 30 мм.

Начальное условие – параболическое («грубое» начальное приближение),

n - номер итерации по методу (3.26)-(3.28).

Выводы по главе 3

1. Разработана математическая модель расчета радиационно-кондуктивного прогрева исследуемого образца материала ТЗМК-10, реализованная на программном языке MATLAB
2. Проведена проверка численного алгоритма на точных аналитических решениях
3. Сходимость численного алгоритма для расчета теплового состояния внутри высокопористого образца с высокими коэффициентами рассеяния была достигнута только в рамках предлагаемого трехшагового метода.

Глава 4. Результаты экспериментального исследования

4.1 Подготовка тепловых испытаний. Цели и задачи

Основными целями проведенных тепловых испытаний образцов материала ТЗМК-10 являлось: определение, с использованием термопарных измерений, одномерных полей температур в направлении перпендикулярном плоскости осаждения волокон в образцах, имеющих форму плоских пластин, и определение тепловых потоков на нагреваемых поверхностях образцов в условиях нестационарного радиационно-кондуктивного нагрева в вакууме, в диапазоне температур от комнатной до 1000°C.

Предполагалось, что исследуемый материал является термостабильным в исследуемом диапазоне температур 21÷1000°C.

Для решения задач исследования проводились следующие измерения :

Основные измерения:

- $T_i(\tau), 0 \leq \tau \leq \tau_e$ - изменение температур в заданных точках схемы измерений $X_i, i = \overline{1, M}$ в образцах исследуемого материала;
- $T_i(\tau), 0 \leq \tau \leq \tau_e$ - изменение температур в заданных точках схемы измерений $X_i, i = \overline{M+1, M1}$ в датчиках плотности теплового потока на обратных поверхностях образцов. Предполагалось, что плотность теплового потока определяется из решения соответствующей граничной обратной задачи теплопроводности [63] по результатам измерений температур в датчике.
- $T_{НЭ}(\tau), 0 \leq \tau \leq \tau_e$ - изменение температуры нагревательного элемента (НЭ) экспериментального модуля (ЭМ) (используется для определения плотности теплового потока от (НЭ), и в системе управления нагревом);
- $I(\tau), 0 \leq \tau \leq \tau_e$ - изменение тока в цепи НЭ и $U(\tau), 0 \leq \tau \leq \tau_e$ - изменение напряжения на границах рабочей зоны НЭ. Данные характеристики используются для расчета электрической мощности выделяемой в рабочей зоне НЭ при определении плотности теплового потока на НЭ.

Дополнительные измерения:

- Геометрические размеры и масса образцов для определения (уточнения) плотности исследуемого материала.
- Геометрические размеры и масса датчиков теплового потока для определения (уточнения) плотности используемого в датчиках материала.

В процессе подготовки и проведения тепловых испытаний в соответствии с ТЗ были решены задачи и выполнены следующие работы:

- Разработано и согласовано ТЗ на подготовку и проведение тепловых испытаний;
- Проведено фотографирование образцов, а также обмер и взвешивание образцов с целью определения (уточнения) плотности исследуемого материала;
- Разработаны и реализованы конструктивные и технологические решения проблем, связанных с необходимостью обеспечения хорошей повторяемости условий проведения испытаний при смене схемы измерений в образцах (включая проблемы обеспечения минимизации и стабильности контактных термических сопротивлений между элементами образцов и датчиков тепловых потоков, проблемы обеспечения повторяемости режимов нагрева и др.). Для выбора решений была проведена необходимая технологическая НИР с использованием пробных образцов.
- Проведено математическое моделирование прогрева конструктивной сборки из материала ТЗМК-10 (образец + датчик теплового потока + теплоизолирующая пластина) с целью выбора толщин элементов образцов и датчиков теплового потока.
- Разработана конструкция экспериментальных образцов и датчиков теплового потока (включая, схему температурных измерений, выбор термодатчиков, и др.);
- Доработана конструкция экспериментального модуля ЭМ-2Т с учетом свойств исследуемых образцов материала и исходных данных на испытания;

- Разработана методика подготовки и проведения данных тепловых испытаний на основе общей методики проведения тепловых испытаний на стенде ТВС-2М с модулем ЭМ-2Т;

- Проведено изготовление и контроль термодатчиков, изготовление и препарирование экспериментальных образцов, изготовление элементов доработанного ЭМ (включая НЭ с управляющими термопарами, теплоизоляционные оправки и средства электроизоляции, изготовление и контроль датчиков теплового потока из материала ТЗМК-10;

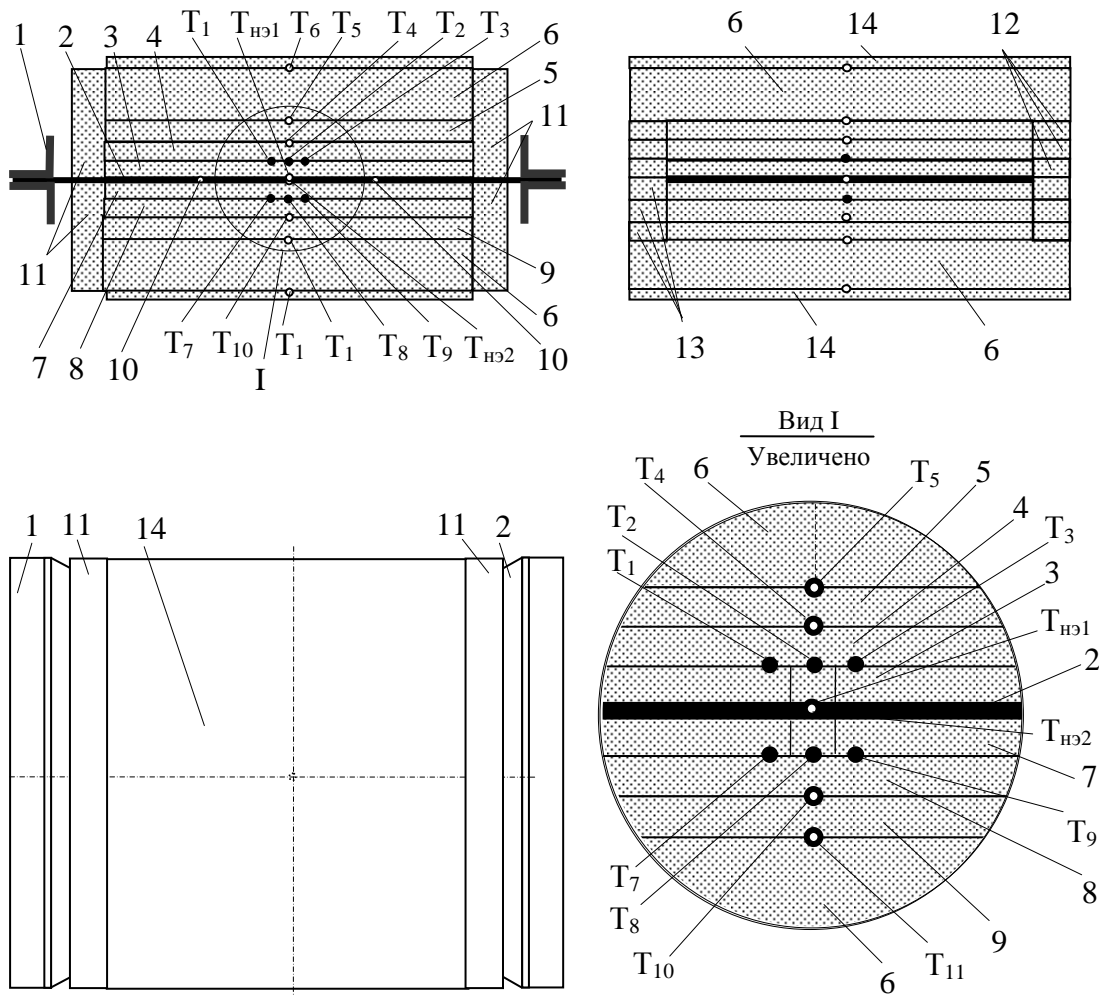
- Проведена сборка ЭМ, предварительный контроль качества управляющих и измерительных линий, установка ЭМ в вакуумную камеру, подключение и контроль управляющих и измерительных линий к автоматизированной системе (АС). Проверка и подготовка систем стенда;

Для проведения тепловых испытаний материала ТЗМК-10 были разработаны и изготовлены два одинаковых экспериментальных образца А и В имеющие форму квадратных пластин с размерами (длина×ширина×толщина) ~100×100×20 мм (рис. 4.1). Каждый образец конструктивно представляет собой сборку из двух одинаковых квадратных пластин (секций) А1, А2 и В1, В2 соответственно, с размерами (длина×ширина×толщина) ~100×100×10 мм.

Физические параметры образцов и их элементов представлены в таблице 4.1. Значения геометрических размеров образцов даны по результатам измерений в пяти точках

Таблица 4.1 Геометрические параметры образцов А и В

Образец	Толщина, мм	Секция	Длина, мм	Ширина, мм	Толщина секции, мм
А	20,21	А1	99,96	99,38	10,11
		А2	99,44	100,06	10,10
В	20,60	В1	100,80	100,25	10,16
		В2	99,66	99,67	10,44



© Тепловая Лаборатория ТО НИО-601 МАИ, 2014,

1 – прижимная планка НЭ, 2 – нагревательный элемент (НЭ), 3 – секция А1 образца А, 4 – секция А2 образца А, 5 – датчик теплового потока D_A на образце А, 6 – прижимная теплоизолирующая пластина, 7 – секция В1 образца В, 8 – секция В2 образца В, 9 – датчика теплового потока D_B на образце В, 10 – точки измерения напряжения на НЭ, 11 – теплоизолирующая пластина, 12 – натяжные теплоизолирующие рамки на образце А, 13 – натяжные теплоизолирующие рамки на образце В, 14 – дополнительная электроизолирующая пластина.

$T_{нэ1}$ – «управляющая» термопара на НЭ и нагреваемой поверхности образцов А и В,
 $T_{нэ2}$ – резервная «управляющая» термопара на НЭ и нагреваемой поверхности образцов А и В,

$T_1, T_2,$ и T_3 – исследуемые термопары в образце А,

T_4 – термопара на обратной поверхности образца А и на нагреваемой поверхности датчика,

T_5 – термопара на обратной поверхности датчика теплового потока на образце А,

T_6 – термопара на обратной поверхности прижимной пластины на образце А,

$T_7, T_8,$ и T_9 – исследуемые термопары в образце В,

T_{10} – термопара на обратной поверхности образца В и на нагреваемой поверхности датчика,

T_{11} – термопара на обратной поверхности датчика теплового потока на образце В,

T_{12} – термопара на обратной поверхности прижимной пластины на образце В

Рис 4.1 Схема тепловых испытаний

Средняя плотность материала ТЗМК-10 определенная путем взвешивания и расчета объема образцов составляла 149,2 кг/м³.

Парные секции экспериментальных образцов А1, А2 (В1, В2) в процессе их сборки в экспериментальный модуль плотно прижимались друг к другу.

В испытаниях использовалась симметричная схема нагрева двух образцов А и В (рис. 4.1).

В качестве исследуемых термопар в образцах использовались термопары типа Хромель-Алюмель (тип К) с различными диаметрами проводов (рис. 4.2) Целевые термопары устанавливались между секциями образца в его середине на расстоянии 5 мм друг от друга с изотермическими участками длиной ~100 мм. В образце А: - термопара Т1 (0,05мм, сварка «встык»), термопара Т2 (0,1мм, сварка «встык»), термопара Т3 (0,2мм, сварка «с корольком», диаметр королька термопары Ø 0,45мм).

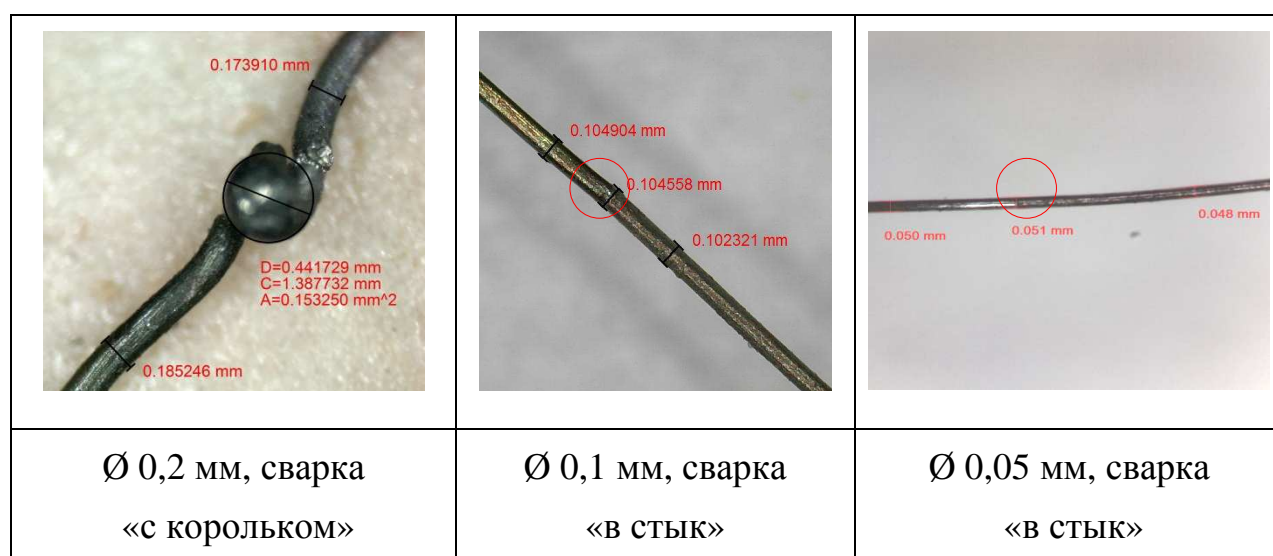


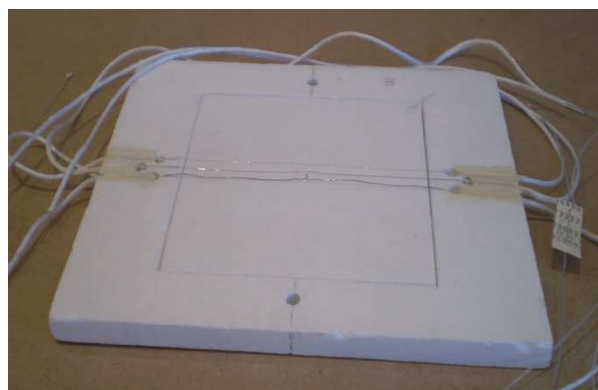
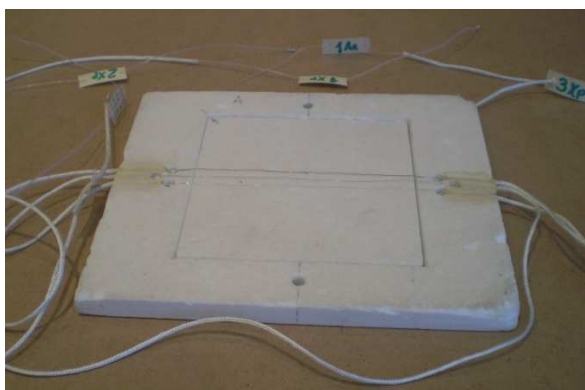
Рис. 4.2 Целевые термопары при увеличении

Все секции образцов были изготовлены из одного исходного блока материала ТЗМК-10, с целью уменьшения возможного разброса физических свойств.

В пределах образцов термоэлектроды термопар специально не электроизолировались в связи с хорошими электроизоляционными свойствами материала ТЗМК-10. Каждая секция образцов оборудована отдельной натяжной

теплоизолирующей рамкой 12 или 13, соответственно, изготовленной из материала ТЗМК-10. Термопары натягивались и закреплялись на этих рамках с помощью керамических втулок, выполняющих роль лабиринтных замков. Одновременно рамки играли роль теплоизолирующих оправок образцов. Размеры рамок: внешние (длина×ширина×толщина) $\sim 170 \times 145 \times 10$ мм; внутренние (длина×ширина×толщина) $\sim 100 \times 100 \times 10$ мм. Каждая секция образца и соответствующая рамка вырезались из одной пластины материала ТЗМК-10, которая так же была вырезана из общего с образцами блока материала.

На рис. 4.3 представлены секции А1 и В1 (позиции 3 и 7 на рис. 4.1) образцов А и В с установленными целевыми термопарами в натяжных рамках.



а) - секция А1 экспериментального образца А с целевыми термопарами T_1 , T_2 , T_3 и натяжной теплоизолирующей рамкой
 б) - секция В1 экспериментального образца В с целевыми термопарами T_7 , T_8 , T_9 и натяжной теплоизолирующей рамкой

Рис. 4.3 Экспериментальные образцы

На обратных поверхностях секций А2 и В2 (позиции 4 и 8 на рис. 4.1) устанавливались термопары T_4 и T_{10} соответственно. Эти термопары типа Х-А с диаметром проводов 0,05мм сваренные способом «встык» крепились на соответствующих натяжных рамках указанных секций.

На обратных поверхностях образцов А и В размещались датчики теплового потока DA и DB (позиции 5 и 9 на рис. 4.1) выполненные в виде пластин с размерами (длина×ширина×толщина) $\sim 100 \times 100 \times 10$ мм. На натяжных рамках

датчиков теплового потока закреплялись термопары Т5 и Т11 типа Х-А с диаметром проводов 0,05мм сваренные способом «встык». Размеры рамок: внешние (длина×ширина×толщина) ~170×145×10 мм; внутренние (длина×ширина×толщина) ~100×100×10 мм. Датчик и соответствующая рамка вырезались из одной пластины материала ТЗМК-10, которая была вырезана из общего с образцами блока материала.

На обратных поверхностях датчиков плотности теплового потока (позиции 5 и 9 рис. 4.1) устанавливались прижимные пластины (позиция 6 рис. 4.1) с размерами (длина×ширина×толщина) ~170×145×20 мм из материала ТЗМК-10. На обратных поверхностях прижимных пластин устанавливались термопары Т6 и Т12 типа Х-А с диаметром проводов 0,05мм сваренные способом «встык». Эти термопары фиксировались на поверхности прижимных пластин термостойким клеем и электроизолировались от металлических прижимных панелей дополнительными пластинами из материала ТЗМК-10 с размерами (длина×ширина×толщина) ~170×145×6 мм.

В таблице 4.2 представлены геометрические размеры датчиков плотности теплового потока и прижимных пластин. Средние значения толщины даны по результатам измерений в восьми точках на поверхности пластины

Таблица 4.2 Параметры датчиков плотности теплового потока

Датчик/пластина	Длина*, мм	Ширина*, мм	Толщина, мм
D _A	99,77	100,09	10,13
Пластина на образце А	169,80	145,70	19,87
D _B	99,99	100,17	10,38
Пластина на образце В	169,15	145,60	20,11

Следует отметить, что прижимные пластины из материала ТЗМК-10 (позиция 6 на рис. 4.1) целесообразно рассматривать в качестве составной части

соответствующего датчика плотности теплового потока. С учетом этого для температурных измерений в датчиках теплового потока может быть использована схема измерений, представленная в таблице 4.3

Вариант датчика с увеличенной за счет прижимной пластины толщиной будет работать в случае получения заметной (измеряемой) температурной «реакции» на обратной поверхности, т.е. $T_6(\tau) \neq const$ и $T_{12}(\tau) \neq const$.

Термоэлектроды всех термопар за пределами образцов и датчиков тепловых потоков электроизолировались с помощью фторопластового кембрика и стеклочулка.

Таблица 4.3. Температурные измерения в датчиках плотности теплового потока

Координата, мм ----- Термопара	Датчик D _A на образце А	Датчик D _B на образце В	Примечание
X ₁ ----- T _i	0,0 ----- T ₄	0,0 ----- T ₁₀	Нагреваемая поверхность датчика
X ₂ ----- T _i	10,13 ----- T ₅	10,38 ----- T ₁₁	Внутри датчика
X ₃ ----- T _i	30,0 ----- T ₆	30,49 ----- T ₁₂	На обратной поверхности датчика

Схема температурных измерений (количество и координаты точек измерения) при проведении испытаний в образцах выбиралась с учетом: требований решаемой задачи исследований, физических свойств исследуемого материала и представлена в таблице 4.4

Таблица 4.4 - Схемы температурных измерений в образцах А и В

Координата, мм ----- Термопара	Образец А	Образец В	Примечание
X_1 ----- T_i	0,0 ----- T_0	0,0 ----- T_0	Нагреваемая поверхность образца $T_0 = T_{из1}$
X_2 ----- T_i	10,11 ----- T_1, T_2, T_3	10,16 ----- T_7, T_8, T_9	Граница между секциями образца
X_3 ----- T_i	20,21 ----- T_4	20,60 ----- T_{10}	Обратная поверхность образца

4.2 Методика проведения тепловых испытаний.

Предварительные испытания

Методика подготовки и проведения тепловых испытаний, исследуемых образцов построена на основе общей методики тепловых испытаний на стенде ТВС-1М [4].

С учетом имеющегося научно-технического задела по проведению тепловых испытаний образцов материала ТЗМК-10 [49] было принято решение не проводить пробные тепловые испытания с использованием специальных пробных образцов.

Пробные испытания были заменены предварительными испытаниями штатных образцов материала. В этих испытаниях проводилась комплексной проверки работоспособности систем стенда и АС, подбор и отладка режима и программы управления нагревом образцов. Предварительные испытания проводились в процессе сушки и прожига штатных образцов в вакууме, а также в процессе штатных испытаний.

Предварительные испытания позволили подготовить образцы и экспериментальный модуль ЭМ-2Т к проведению штатных испытаний. В частности, просушить образцы, датчики, теплоизолирующие элементы и клеевые соединения, удалив из них адсорбированную влагу и летучие вещества. Результаты предварительных испытаний позволили скорректировать программы управления нагревом для обеспечения заданных значений темпа нагрева и температуры нагреваемых поверхностей образцов.

Тепловые испытания образцов с использованием схемы испытаний приведенной на рис. 4.1 проводились в два этапа. На первом этапе использовалась схема измерений, приведенная в таблице 4.5. На втором этапе использовалась та же схема измерений, но с удаленными целевыми термопарами T_2, T_3 и T_7, T_8 , т.е. внутри образцов были оставлены только термопары с диаметром проводов 0,05мм.

На первом этапе испытаний вначале был реализован менее теплонагруженный режим нагрева №2. Программа нагрева $T_{pr}(X_1, \tau), 0 \leq \tau \leq \tau_e$ представлена в таблице 4.5 и на рис. 4.4

Таблица 4.5 – Программа нагрева поверхности образцов на режиме №2

τ, c	0	5	25	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
$T, ^\circ C$	T_R	T_R	35	50	106	234	400	548	712	765	785	894	971	999	999

Продолжение таблицы 4.5

τ, c	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500
$T, ^\circ C$	985	975	969	947	893	835	760	686	592	502	422	357	318	289

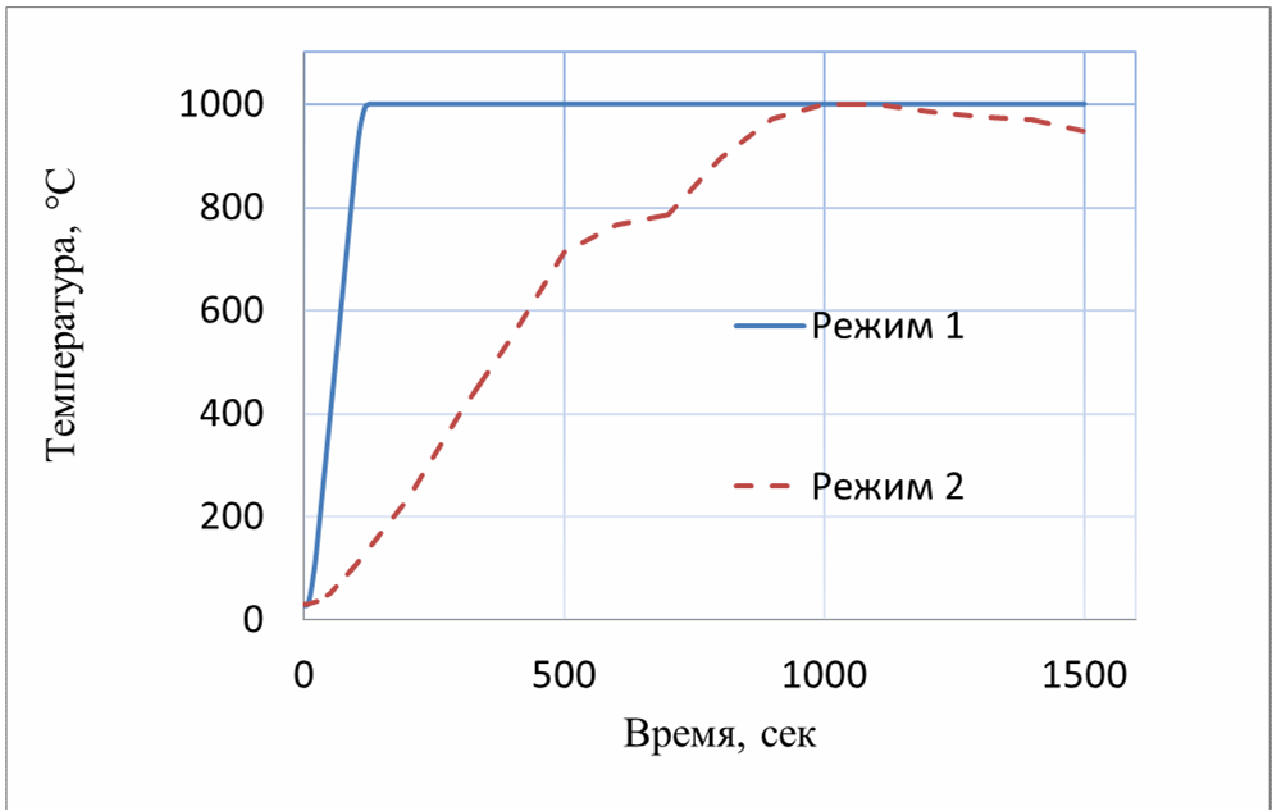


Рис. 4.4 – Программа нагрева поверхности образцов $T_{pr}(\tau)$ на режимах №1 и №2

Участок 0: Линейный участок с постоянной комнатной температурой $T_{pr}(X_1, \tau) = T_R$ (необходим для выхода системы управления нагревом на заданный режим).

Участок 1: Нагрев по программе от комнатной температуры $T_{pr}(X_1, 0) = T_R$ до момента времени выключения нагревательного элемента (НЭ) $\tau = \tau_e$ и прекращения записи результатов измерений.

Участок 2: Остывание образцов от момента выключения НЭ до температуры $T_{pr} = T_R$ в вакуумной камере.

Температура T_R определялась, как температура поверхности образца установленного в ЭМ в вакуумной камере в момент начала испытаний.

Продолжительность участка 0 уточнялась в процессе предварительных испытаний. Момент времени выключения НЭ корректировался для подбора

характера изменения температур на обратных поверхностях датчиков тепловых потоков $T_5(\tau)$ и $T_{11}(\tau)$ или $T_6(\tau)$ и $T_{12}(\tau)$ (при увеличенной толщине датчика) при проведении предварительных испытаний. Неуправляемый режим охлаждения образцов на участке 2 не лимитировался. Условия на боковых поверхностях экспериментальных образцов принимались соответствующими условиям теплоизолированной стенки ($q=0$). Испытания проводились в вакууме при относительно постоянном давлении. В этом диапазоне изменения давления значения коэффициента теплопроводности слабо зависят от давления окружающей среды. Для обеспечения этих значений вакуума в процессе испытания использовался прием, при котором постоянно работающая форвакуумная система вакуумирования стенда ТВС-2М обеспечивает поддержание некоторого относительно постоянного, предельного для нее значения давления в вакуумной камере. Значения давления определялись и контролировались в ходе штатных испытаний. При реализации программы нагрева в качестве «управляющей» использовалась термопара $T_{нэ1}$ типа ХА (тип К) с диаметром термоэлектродов 0,05 мм, установленная (приваренная) на НЭ экспериментального модуля.

На втором этапе испытаний был реализован более теплонагруженный (с большим темпом нагрева) режим нагрева №1. Программа нагрева $T_{pr}(X_1, \tau)$, $0 \leq \tau \leq \tau_e$ представлена в таблице 4.6 и на рис. 4.4

Таблица 4.6 Программа нагрева поверхности образцов на режиме №1

τ, c	0	5	8	10	12	14	16	18	20	22	24	101
$T, ^\circ C$	T_R	T_R	43	47	53	61	71	83	97	113	131	900

Продолжение таблицы 4.6

τ, c	103	105	107	109	111	113	115	117	119	122	126	1500
$T, ^\circ C$	918	934	948	960	970	978	986	992	996	998	1000	1000

Участок 0: Линейный участок с постоянной комнатной температурой $T_{pr}(X_1, \tau) = T_R$ (необходим для выхода системы управления нагревом на заданный режим).

Участок 1: Нагрев по программе от комнатной температуры $T_{pr}(X_1, 0) = T_R$ до момента времени выключения нагревательного элемента (НЭ) $\tau = \tau_e$ и прекращения записи результатов измерений.

Участок 2: Остывание образцов от момента выключения НЭ до температуры $T_{pr} = T_R$ в вакуумной камере.

Температура T_R определялась, как температура поверхности образца установленного в ЭМ в вакуумной камере в момент начала испытаний.

Продолжительность участка 0 уточнялась в процессе предварительных испытаний. Момент времени выключения НЭ корректировался для подбора характера изменения температур на обратных поверхностях датчиков тепловых потоков $T_5(\tau)$ и $T_{11}(\tau)$ или $T_6(\tau)$ и $T_{12}(\tau)$ (при увеличенной толщине датчика) при проведении предварительных испытаний. Неуправляемый режим охлаждения образцов на участке 2 не лимитировался.

Условия на боковых поверхностях экспериментальных образцов принимались соответствующими условиям теплоизолированной стенки ($q = 0$).

Испытания проводились в вакууме при относительно постоянном давлении $\sim 1 \times 10^{-4}$ бар. В этом диапазоне изменения давления значения коэффициента теплопроводности слабо зависят от давления окружающей среды. Для обеспечения этих значений вакуума в процессе испытания использовался прием, при котором постоянно работающая форвакуумная система вакуумирования стенда ТВС-2М обеспечивает поддержание некоторого относительно

постоянного, предельного для нее, значения давления в вакуумной камере. Значения давления определялись и контролировались в ходе штатных испытаний.

При реализации программы нагрева в качестве «управляющей» использовалась термопара $T_{нэ1}$ типа ХА (тип К) с диаметром термоэлектродов 0,05 мм, установленная (приваренная) на НЭ экспериментального модуля.

Использование симметричной схемы тепловых испытаний позволяет определить плотность теплового потока $q_{нэ}(\tau)$ на поверхности нагревательного элемента экспериментального модуля [4].

Для плоского НЭ из термостойкой нержавеющей стали плотность теплового потока может быть рассчитана с использованием соотношения:

$$q_{нэ}(\tau) = \frac{U(\tau) \cdot I(\tau)}{2 \cdot S} - 0,5 \cdot \rho_{нэ} \cdot \delta_{нэ} \cdot C_{нэ}(\tau) \cdot \frac{dT_{нэ}(\tau)}{d\tau}, \quad (4.1)$$

где $U(\tau)$ - напряжение на границах рабочей зоны НЭ, $I(\tau)$ - силы тока в цепи НЭ, S – площадь рабочей зоны НЭ, которая определяется как произведение ширины НЭ на длину рабочей зоны (расстояние между точками измерения напряжения (позиция 10 на рис. 4.1), $\rho_{нэ}$ - плотность материала НЭ, $\delta_{нэ}$ - толщина НЭ, $C_{нэ}$ - теплоемкость материала НЭ, $T_{нэ}(\tau)$ - изменение температуры НЭ в процессе испытаний.

Данная характеристика теплового режима НЭ позволяет провести оценку плотности теплового потока на нагреваемых поверхностях исследуемых образцов.

4.3 Тепловые испытания

В соответствии с принятой схемой испытаний экспериментальные образцы А и В размещались на нагревательном элементе (НЭ) в экспериментальном модуле ЭМ-2Т стенда ТВС-2М. Общая длина нагревательного элемента - 220мм.

Ширина НЭ – 100мм. Длина рабочей зоны НЭ – 50мм, Ширина рабочей зоны НЭ – 100мм. Толщина НЭ – 0,1мм.

В процессе сборки модуля взаимное расположение элементов (нижняя прижимная пластина - датчик теплового потока D_B с натяжной рамкой - экспериментальный образец В из двух секций с натяжными рамками - НЭ - экспериментальный образец А из двух секций с натяжными рамками - датчик теплового потока D_B с натяжной рамкой - верхняя прижимная пластина) фиксировалось с помощью двух направляющих штифтов из плотной керамики и соосных отверстий, выполненных в НЭ и натяжных рамках (рис 4.5).

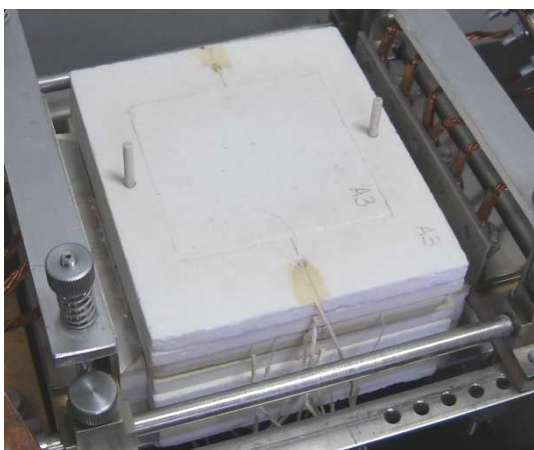


Рис. 4.5 Экспериментальная сборка образцов и датчиков с рамками



Рис. 4.6 – Выводы термопар из экспериментальной сборки

Термоэлектроды управляющей термопары $T_{HЭ1}$, установленной на верхней поверхности НЭ выводились через проколы в секции А1 и крепились на ее натяжной рамке в процессе сборки ЭМ (рис. 4.6). Термоэлектроды резервной управляющей термопары $T_{HЭ2}$, установленной на нижней поверхности НЭ выводились через проколы в секции В1 и крепились на ее натяжной рамке в процессе сборки ЭМ. Таким же образом в процессе сборки модуля через проколы в секции В1 выводились и крепились провода для измерения напряжения на границах рабочей зоны НЭ (позиция 10 на рис. 4.1).

Все термопарные провода, заключенные во фторопластовый кембрик и стеклочулок, выводились из модуля наружу через стыки элементов сборки (рис. 4.7).

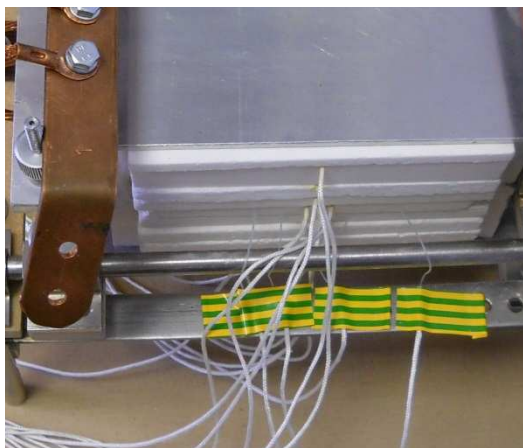


Рис 4.7 Выводы термопар из экспериментальной сборки



Рис. 4.8 Дополнительная электроизолирующая пластина

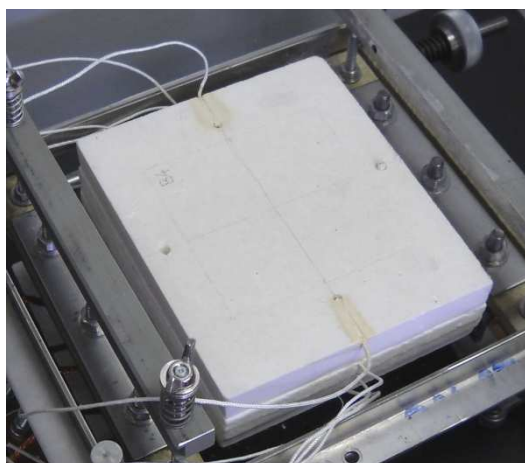


Рис. 4.9 – Прижимная пластина



Рис. 4.10 – Верхнее прижимное устройство модуля с пружинами

При установке образцов с датчиками тепловых потоков в ЭМ на обратные поверхности датчиков устанавливались дополнительные электроизоляционные пластины из ТЗМК-10 (рис. 4.8). Затем вся сборка плотно стягивалась с помощью специальных прижимных устройств экспериментального модуля (рис. 4.9 – 4.10). Прижимные устройства модуля были оснащены специальными тарированными компенсирующими пружинами. Усилие полного сжатия одной пружины составляло 3,5 кг. Полное усилие сжатия четырех пружин составляло 14 кг. Такая

конструкция обеспечивает плотное контролируемое прижатие секций образцов друг к другу и к НЭ, а также прижатие датчиков теплового потока к образцам. Все это позволяет уменьшить контактные термические сопротивления между элементами экспериментальной сборки.

Собранный экспериментальный модуль с образцами (рис. 4.11) устанавливался в вакуумную камеру стенда, подключался к тоководам системы электропитания НЭ и сигнальным линиям системы измерений (рис. 4.12). Перед испытаниями проводился контроль измерительных линий АС.

Далее проводилась сушка и прожиг экспериментальной сборки образцов в вакууме в течение 1000с при средней температуре 500°C и среднем давлении $3,0 \times 10^{-4}$ бар. Затем охлаждение и сохранение экспериментальной сборки в течение суток в условиях вакуума.

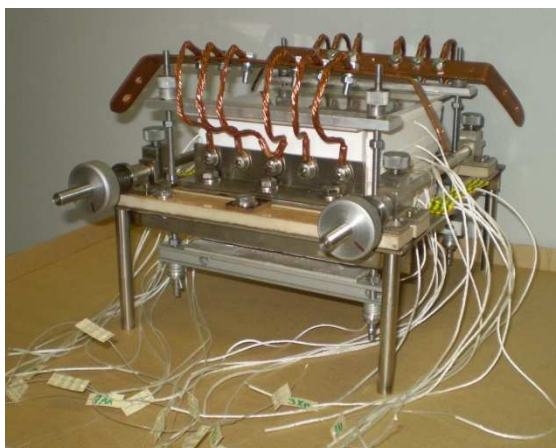


Рис 4.11 Экспериментальная сборка с образцами в модуле ЭМ-2Т

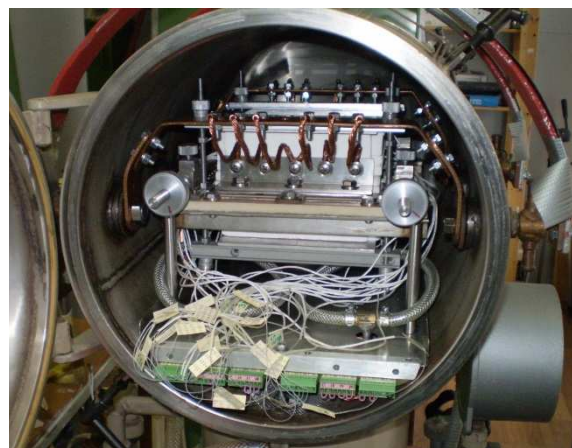


Рис. 4.12 Экспериментальный модуль в вакуумной камере стенда ТВС-2М

Первый этап тепловых испытаний включал:

- Предварительное вакуумирование камеры стенда с установленным модулем и экспериментальной сборкой образцов в течение двух часов.
- **Испытание №1** на режиме нагрева №2. Время фиксации и записи результатов измерений $\tau=1800$ с. Предельный уровень вакуума в находился в диапазоне ($8,0 \times 10^{-5} \div 1,2 \times 10^{-4}$ бар).

Результаты теплового испытания в виде термограмм зависимости плотности теплового потока от времени и графиков зависимости от времени

разности температур измеренных целевыми термопарами после проведения соответствующей первичной обработки представлены на рис. 4.13 – 4.16.

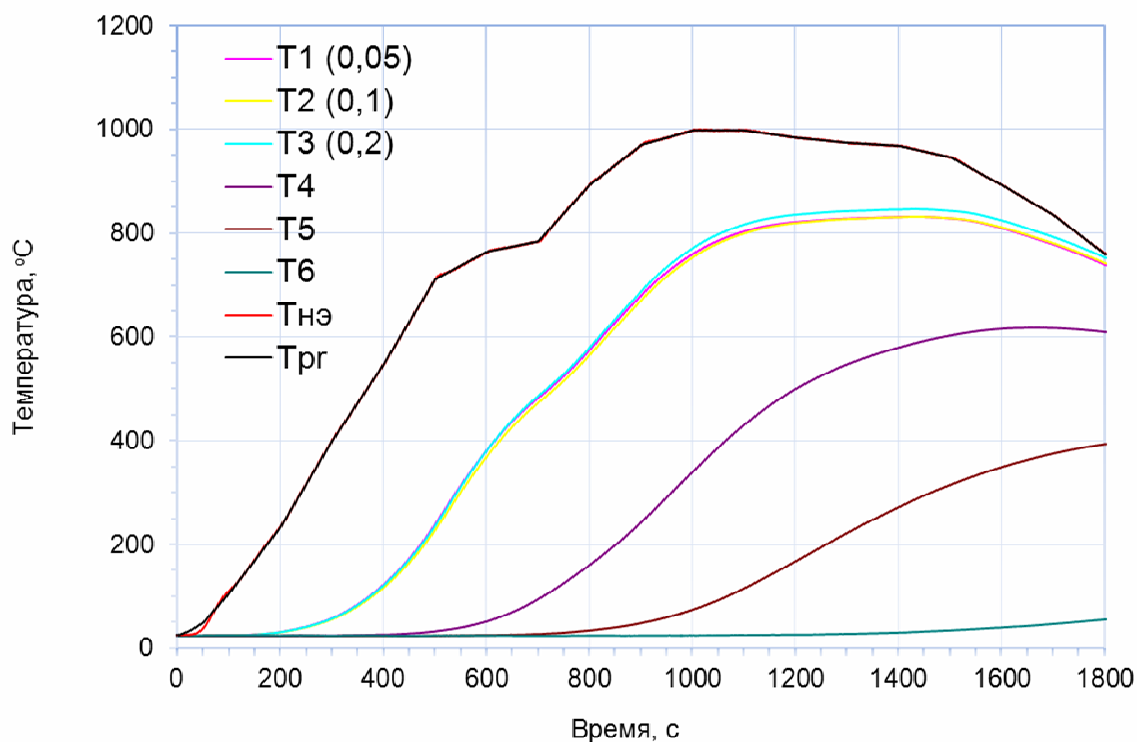


Рис. 4.13 - Результаты теплового испытания №1 образца А, этап 1, режим №2

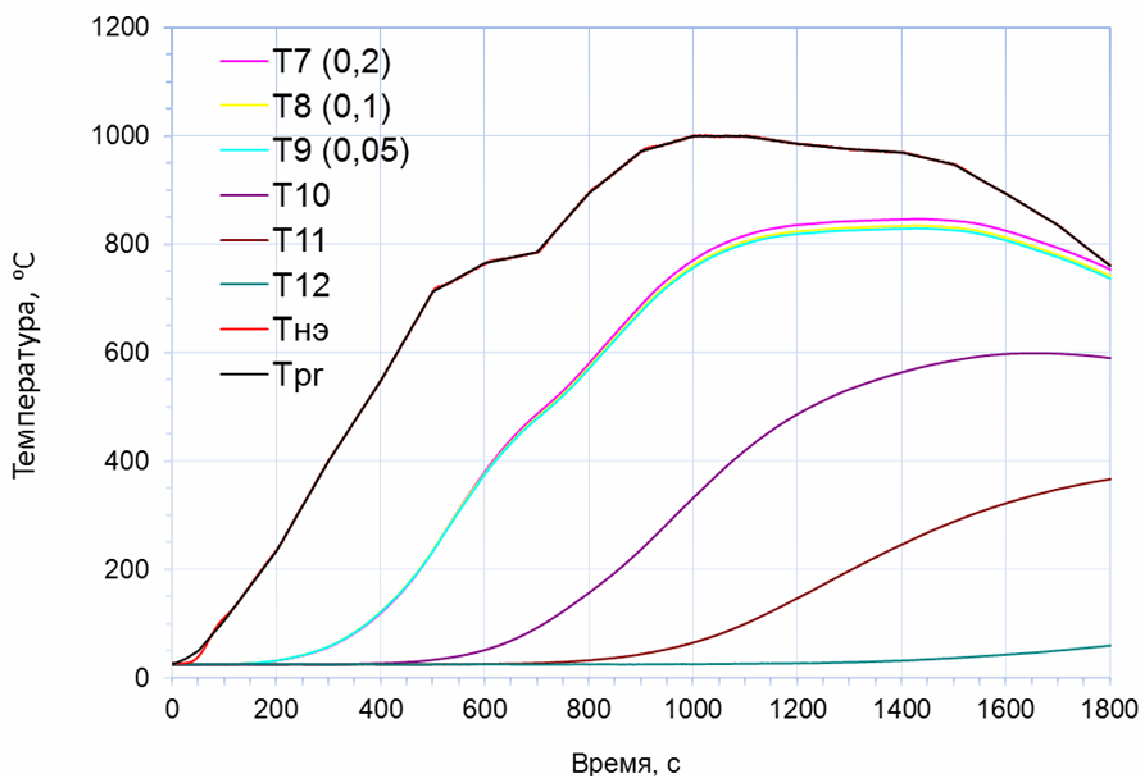


Рис. 4.14 - Результаты теплового испытания №1 образца В, этап 1, режим №2

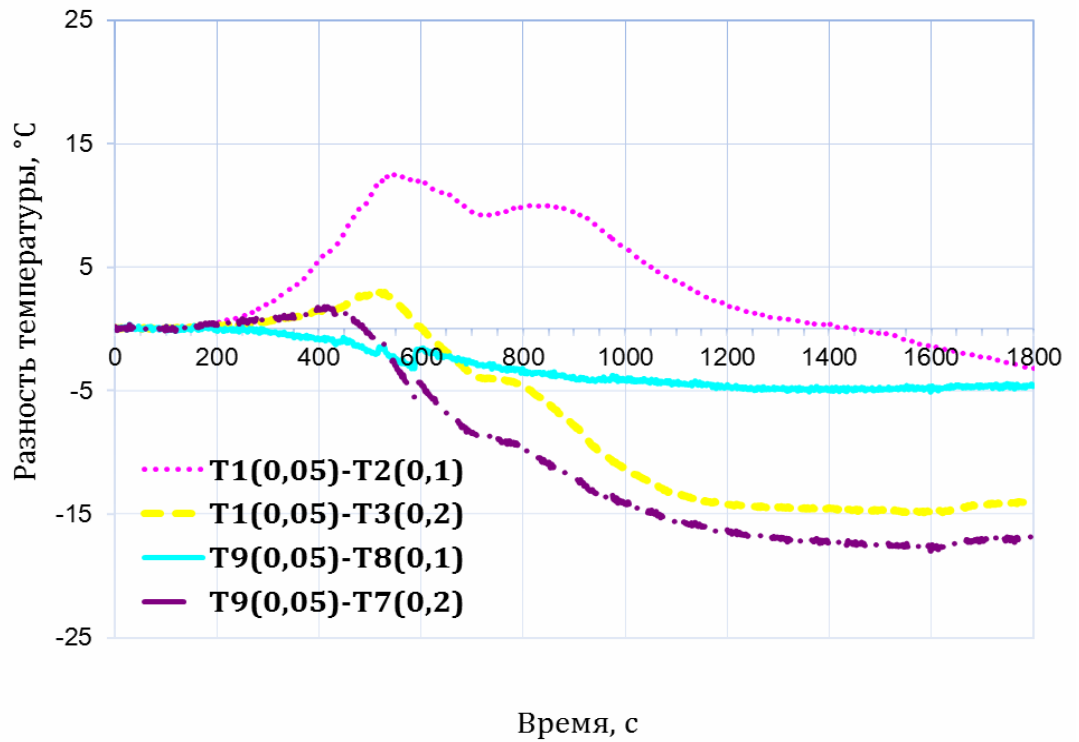


Рисунок 4.15 – Разность температуры целевых термопар в испытании №1, образцов А и В, этап 1, режим №2

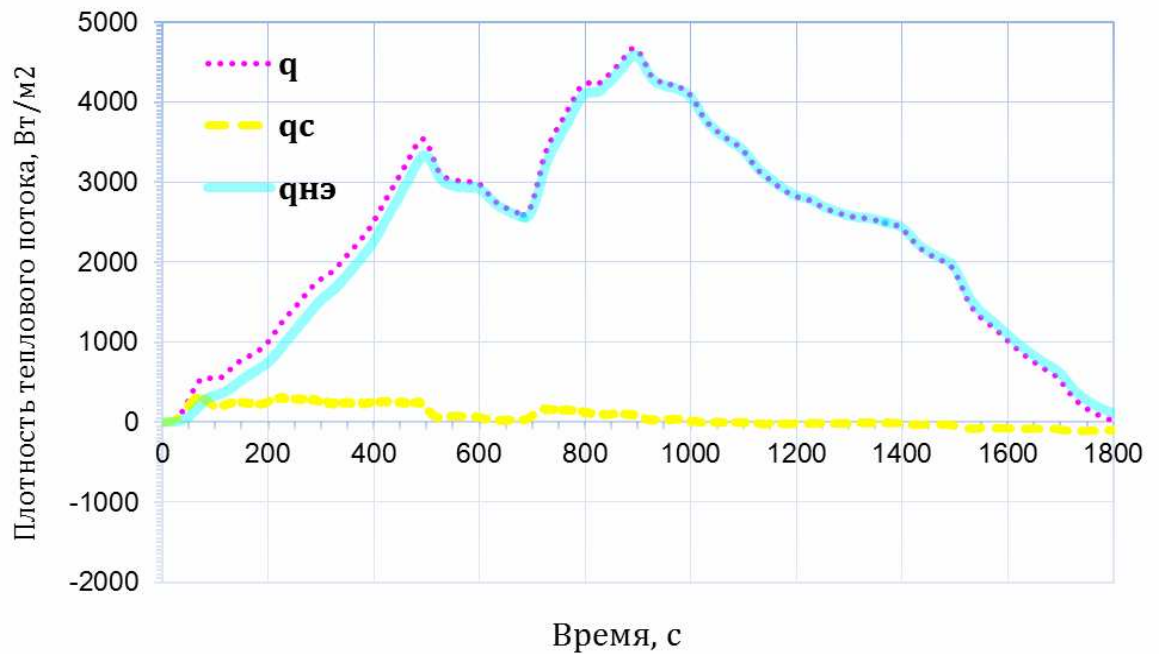


Рисунок 4.16 – Изменение плотности теплового потока на поверхности НЭ в испытании №1

Первичная обработка результатов измерений заключалась в обнаружении и исправлении отдельных значений содержащих грубые ошибки измерений, связанных со сбоями измерительного и регистрирующего оборудования. Отбраковка и исправление этих значений проводились на основе анализа исследуемых зависимостей с учетом физического смысла протекающих процессов теплообмена.

Плотность теплового потока $q_{нэ}(\tau)$, $0 \leq \tau \leq \tau_e$ рассчитывалась с использованием выражения (4.1) при следующих значениях параметров НЭ: $S = 0,005 \text{ м}^2$; $\delta_{нэ} = 0,1 \text{ мм}$; $\rho_{нэ} = (7902 - 0,0584 T_{нэ}) \text{ кг/м}^3$; $c_{нэ}(T) = (500 + 0,1744 \cdot T_{нэ}) \text{ Дж/(кг} \times \text{С)}$. Все расчеты проводились с использованием приложения MS Excel. При расчетах зависимость $T_{нэ}(\tau)$, используемая в выражении (4.1) предварительно сглаживались с использованием метода скользящего среднего из пакета анализа MS Excel.

- Выдержку экспериментальной сборки и ЭМ после испытания №1 и охлаждения в вакуумной камере при давлении $\sim 3,0 \times 10^{-4}$ бар до следующего испытания.
- Вакуумирование камеры стенда с установленным модулем и экспериментальной сборкой образцов в течение двух часов с выходом на примерно постоянный уровень вакуума.
- **Испытание №2** на режиме нагрева №1. Испытание было прервано из-за сбоя системы управления.
- Выдержку экспериментальной сборки и ЭМ после испытания №2 и охлаждения в вакуумной камере при давлении $\sim 3,0 \times 10^{-4}$ бар до следующего испытания в течение .
- Вакуумирование камеры стенда с установленным модулем и экспериментальной сборкой образцов в течение двух часов.

• **Испытание №3** на режиме нагрева №1. Реализованная программа нагрева представлена на рис. 4.4. Время фиксации и записи результатов измерений $\tau=1500\text{с}$. Предельный уровень вакуума в камере при постоянно работающей форвакуумной системе вакуумирования в ходе испытаний находился в диапазоне $(8,5 \times 10^{-5} \div 1,2 \times 10^{-4}$ бар). Результаты теплового испытания в виде термограмм, графика зависимости плотности теплового потока от времени и графиков зависимости от времени разности температур измеренных целевыми термопарами после проведения соответствующей первичной обработки представлены на рисунках 4.17-4.20.

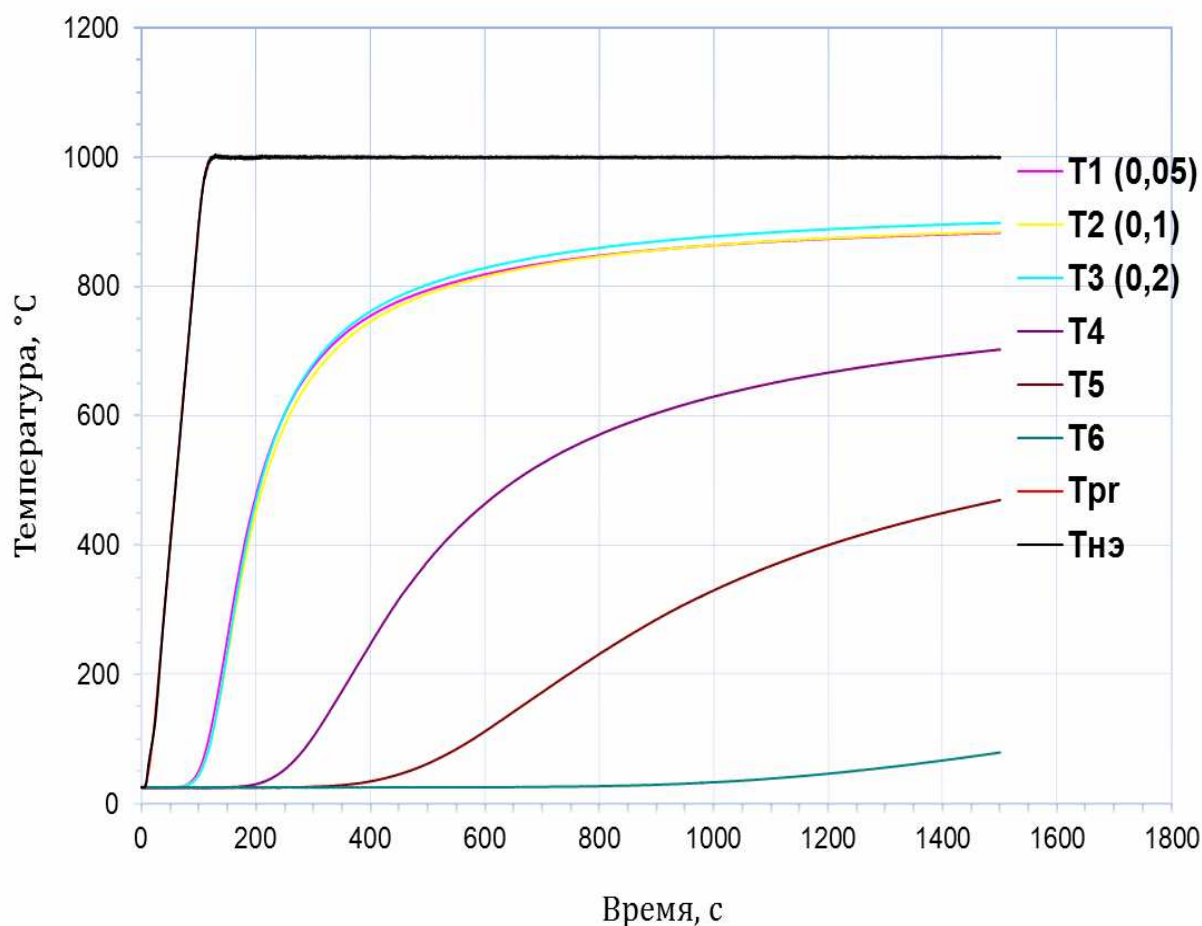


Рис. 4.17 Результаты теплового испытания №3 образца А, этап 1, режим №1

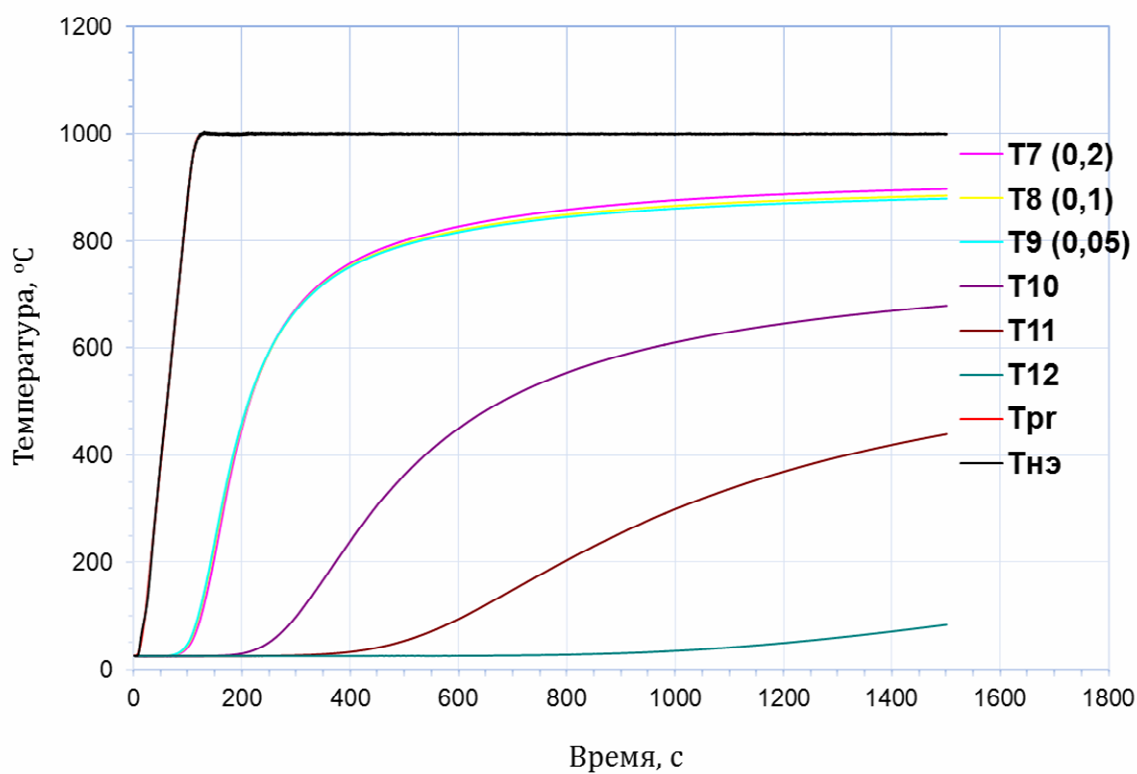


Рис. 4.18 - Результаты теплового испытания №3 образца В, этап 1, режим №1

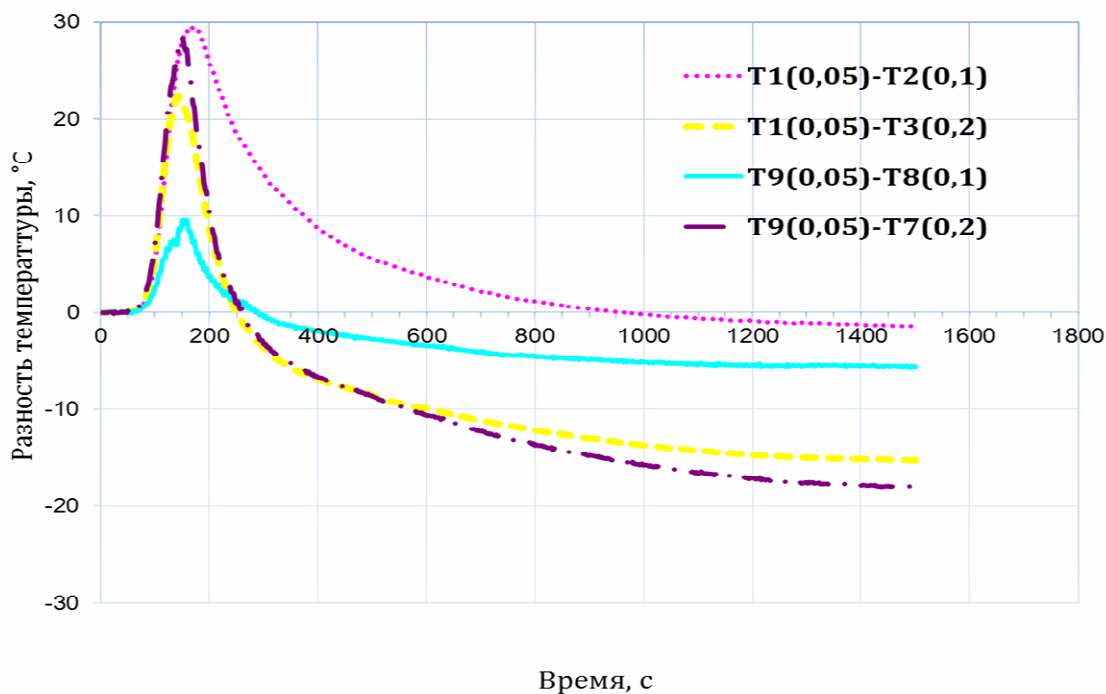


Рис. 4.19 Разность температуры целевых термопар в испытании №3, образцов А и В, этап 1, режим №1

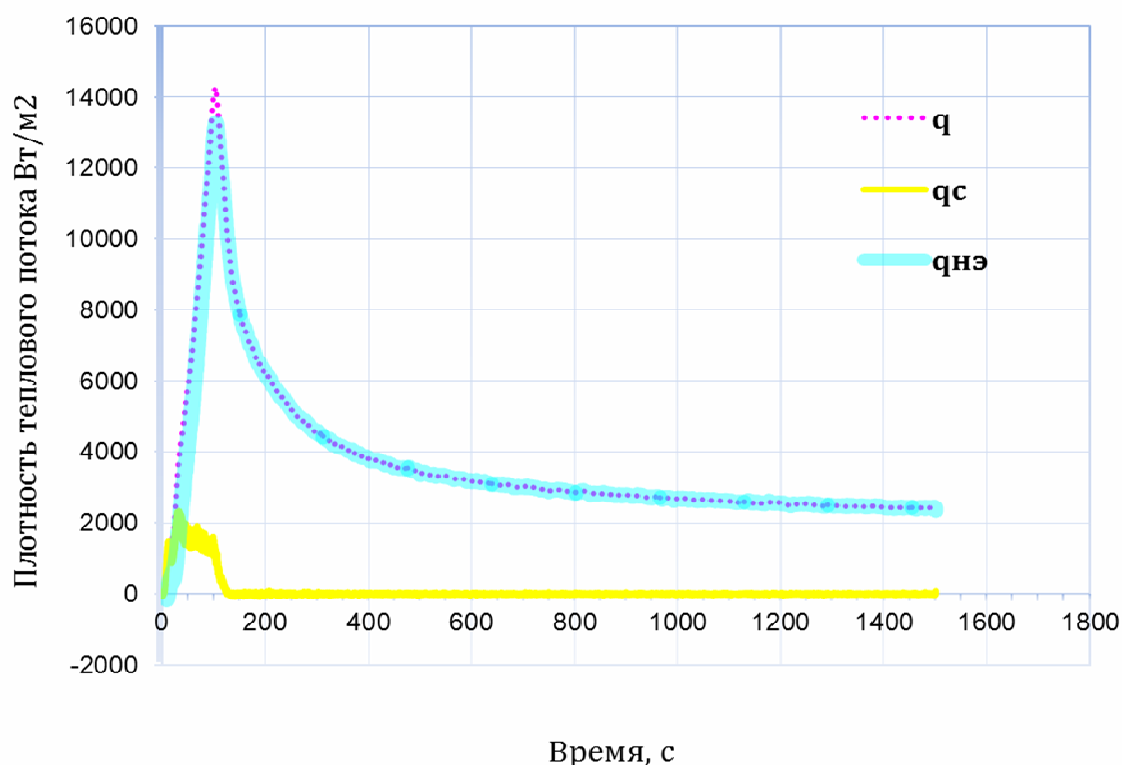


Рис.4.20 Изменение плотности теплового потока на поверхности НЭ в испытании №3

После завершения первого этапа экспериментальный модуль ЭМ-2Т был извлечен из вакуумной камеры стенда. Была проведена частичная разборка экспериментальной сборки образцов, в процессе которой из образцов А и В были удалены целевые термопары T_2 , T_3 и T_7 , T_8 и оставлены целевые термопары T_1 , T_9 с диаметром проводов 0,05мм. После чего экспериментальная сборка была собрана в ЭМ и установлена в вакуумную камеру стенда.

Второй этап тепловых испытаний (образцы с удаленными целевыми термопарами T_2, T_3 и T_7, T_8) включал:

- Предварительное вакуумирование камеры стенда с установленным модулем и экспериментальной сборкой образцов в течение двух часов с выходом на постоянный уровень вакуума.
- **Испытание №4** на режиме нагрева №2. Реализованная программа нагрева $T_{pr}(\tau)$ представлена на рисунке 4.4. Время фиксации и записи результатов измерений $\tau=1800$ с. Предельный уровень вакуума в камере при постоянно

работающей форвакуумной системе вакуумирования в ходе испытаний находился в диапазоне $(7,0 \times 10^{-5} \div 9,0 \times 10^{-5}$ бар). Результаты теплового испытания в виде термограмм $T_i(\tau), 0 \leq \tau \leq \tau_e$ и графика зависимости плотности теплового потока от времени $q_{нэ}(\tau), 0 \leq \tau \leq \tau_e$ после проведения соответствующей первичной обработки представлены на рисунках 4.21 - 4.23.

- С целью оценки влияния на поле температур в образце и в датчиках теплового потока целевых термопар T_2, T_3 и T_7, T_8 на рисунках 4.24 - 4.25 представлены разности температуры ($T_1 - T_{1[ucn1]}$, $T_4 - T_{4[ucn1]}$, $T_5 - T_{5[ucn1]}$, $T_6 - T_{6[ucn1]}$ и $T_9 - T_{9[ucn1]}$, $T_{10} - T_{10[ucn1]}$, $T_{11} - T_{11[ucn1]}$, $T_{12} - T_{12[ucn1]}$) в точках измерений при удаленных целевых термопарах (испытание №4) и при наличии целевых термопар (испытание №1).

- Выдержку экспериментальной сборки и ЭМ после испытания №4 и охлаждения в вакуумной камере при давлении $\sim 3,0 \times 10^{-4}$ бар.

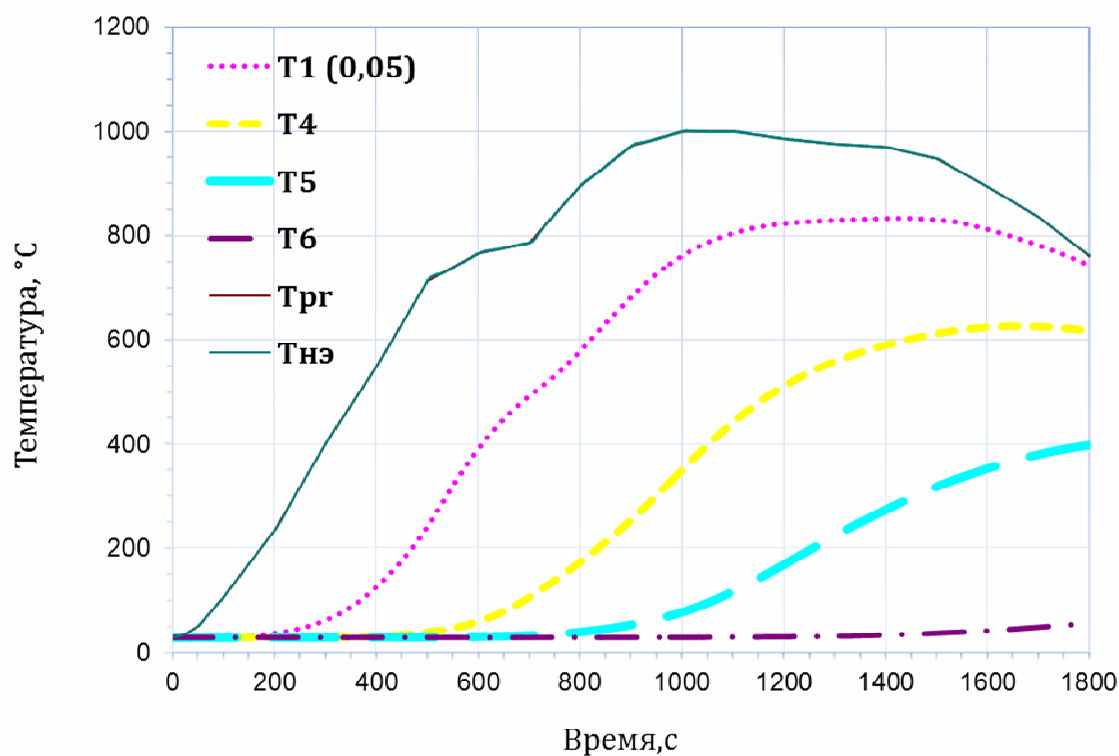


Рис. 4.21 Результаты теплового испытания №4 образца А, этап 2, режим №2

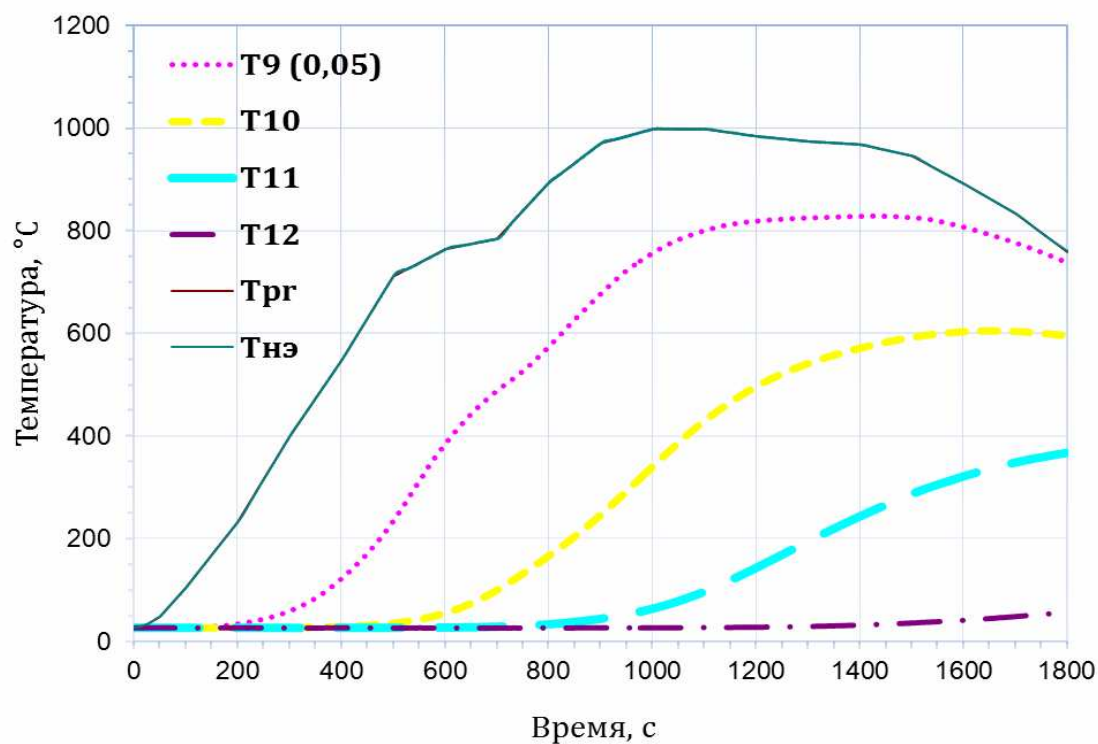


Рис. 4.22 Результаты теплового испытания №4 образца В, этап 2, режим №2

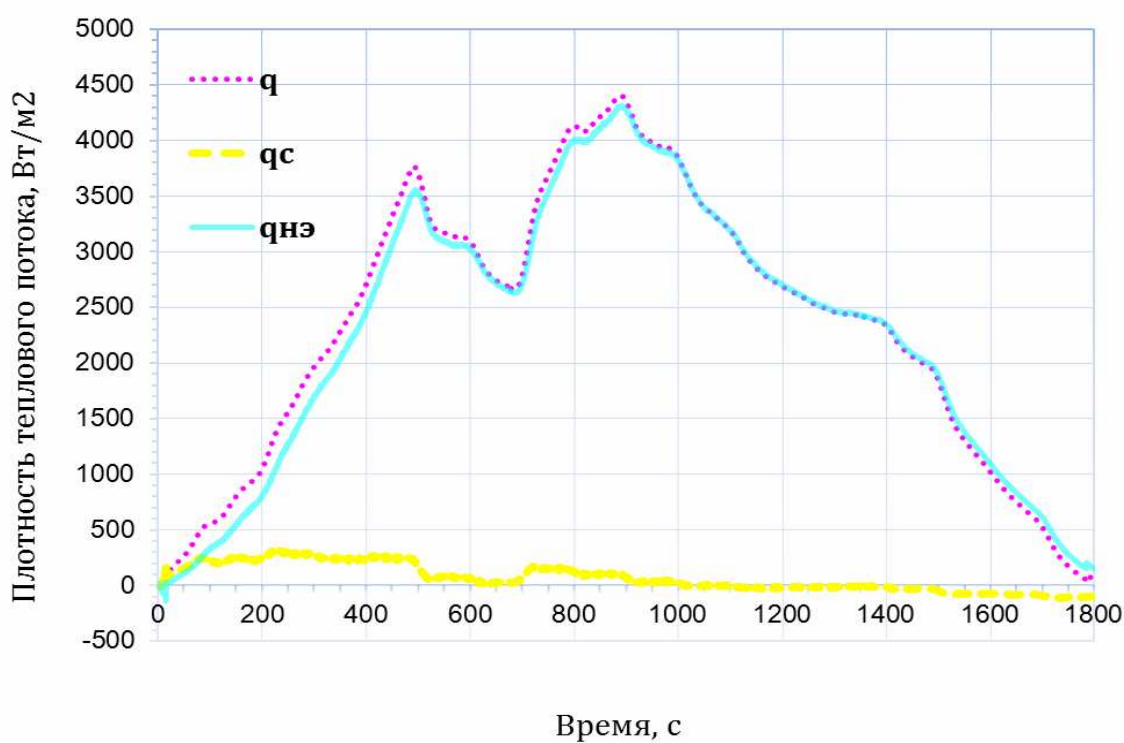


Рис. 4.23 Изменение плотности теплового потока на поверхности НЭ в испытании №4

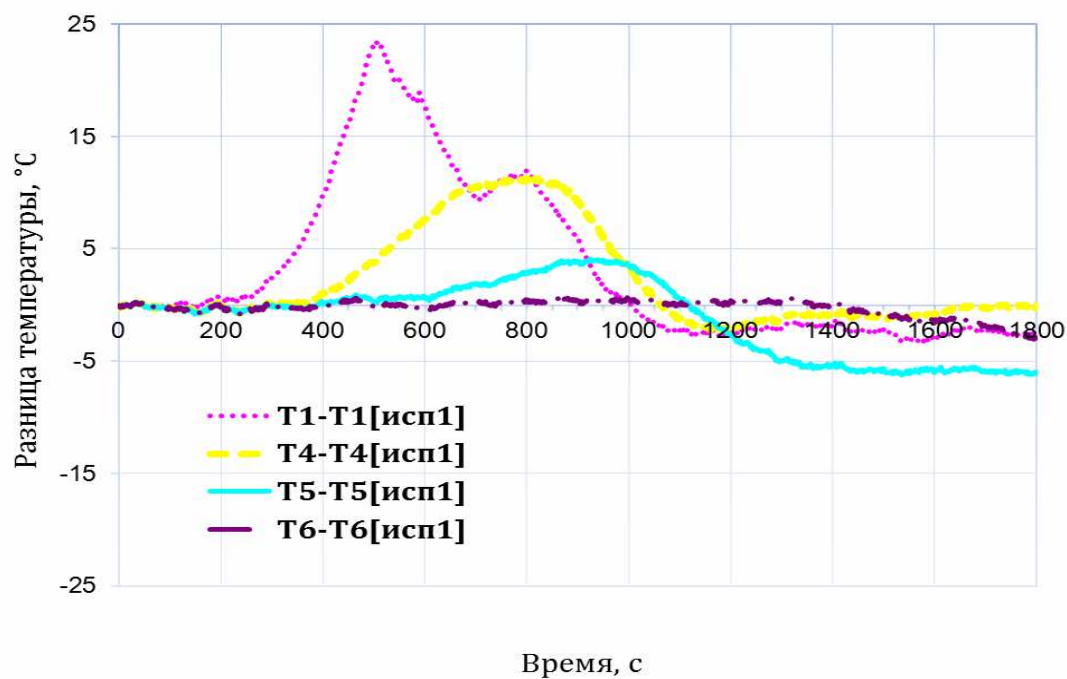


Рис. 4.24 Разность температуры термограмм в испытаниях №4 и №1, образца А, этап 2 (без ТП) и этап 1 (с ТП), режим №2

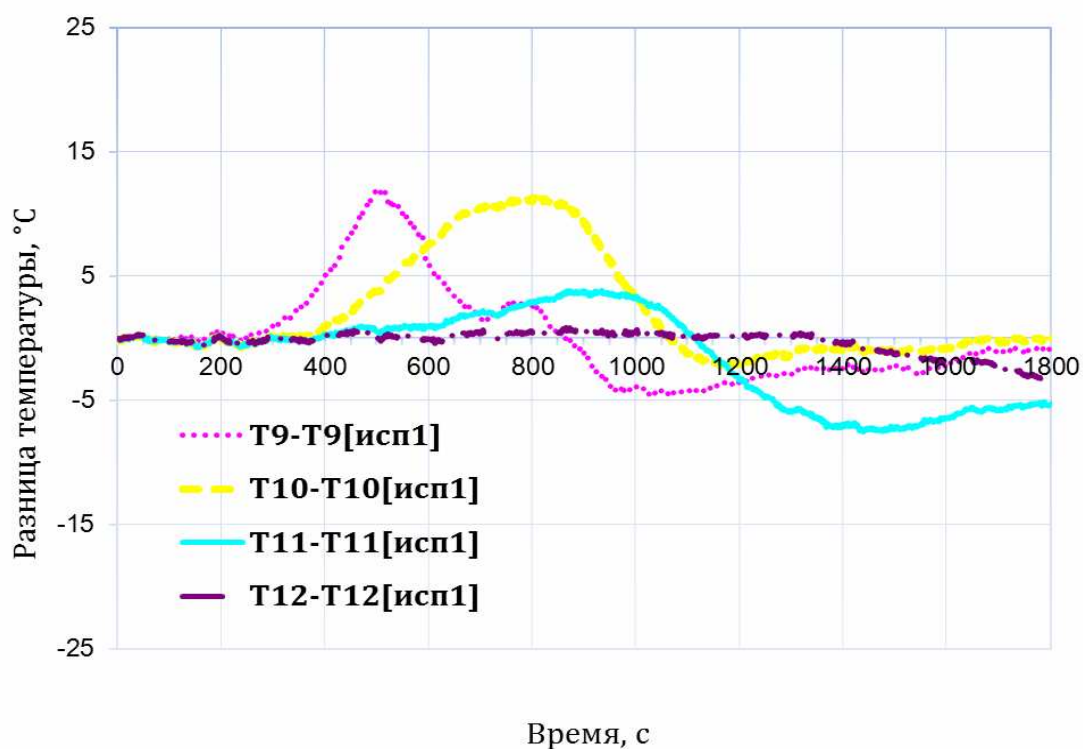


Рис. 4.25 – Разность температуры термограмм в испытаниях №4 и №1, образца В, этап 2 (без ТП) и этап 1 (с ТП), режим №2

- **Испытание №5** на режиме нагрева №1. Реализованная программа нагрева $T_{pr}(\tau)$ представлена на рис. 4.4. Время фиксации и записи результатов измерений $\tau=1500$ с. Предельный уровень вакуума в камере при постоянно работающей форвакуумной системе вакуумирования в ходе испытаний находился в диапазоне $(7,5 \times 10^{-5} \div 1,0 \times 10^{-4})$ бар. На основании предварительного анализа результатов испытания №5 было принято решение повторить это испытание при тех же условиях, проведя дополнительное испытание №6.

- Выдержку экспериментальной сборки и ЭМ после испытания №5 и охлаждения в вакуумной камере при давлении $\sim 3,0 \times 10^{-4}$ бар до следующего испытания.

- Вакуумирование камеры стенда с установленным модулем и экспериментальной сборкой образцов в течение двух часов с выходом на примерно постоянный уровень вакуума.

- **Испытание №6** на режиме нагрева №1. Реализованная программа нагрева $T_{pr}(\tau)$ представлена на рис. 4.4. Время фиксации и записи результатов измерений $\tau=1500$ с. Предельный уровень вакуума в камере при постоянно работающей форвакуумной системе вакуумирования в ходе испытаний находился в диапазоне $(8,0 \times 10^{-5} \div 1,0 \times 10^{-4})$ бар. Результаты теплового испытания в виде термограмм $T_i(\tau), 0 \leq \tau \leq \tau_e$ и графика зависимости плотности теплового потока от времени $q_{нэ}(\tau), 0 \leq \tau \leq \tau_e$ после проведения соответствующей первичной обработки представлены на рис. 4.26 - 4.28.

- С целью оценки влияния на поле температур в образце и в датчиках теплового потока целевых термопар T_2, T_3 и T_7, T_8 произведен расчет разности температуры в точках измерений при удаленных целевых термопарах (исп. №6) и при наличии целевых термопар (исп. №3). Результаты расчетов в виде зависимости разности температуры $(T_1 - T_{1[учн3]}, T_4 - T_{4[учн3]}, T_5 - T_{5[учн3]}, T_6 - T_{6[учн3]}$ и $T_9 - T_{9[учн3]}, T_{10} - T_{10[учн3]}, T_{11} - T_{11[учн3]}, T_{12} - T_{12[учн3]})$ представлены на рис. 4.29-4.30

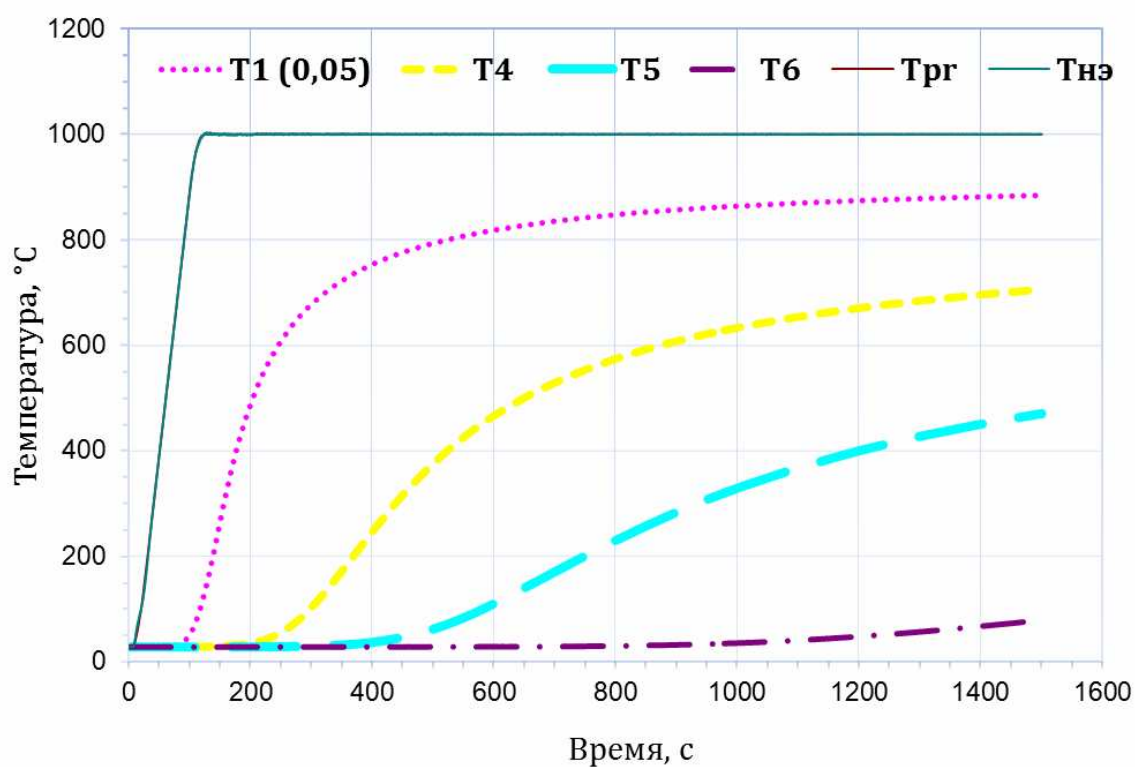


Рис. 4.26 Результаты теплового испытания №6 образца А, этап 2, режим №1

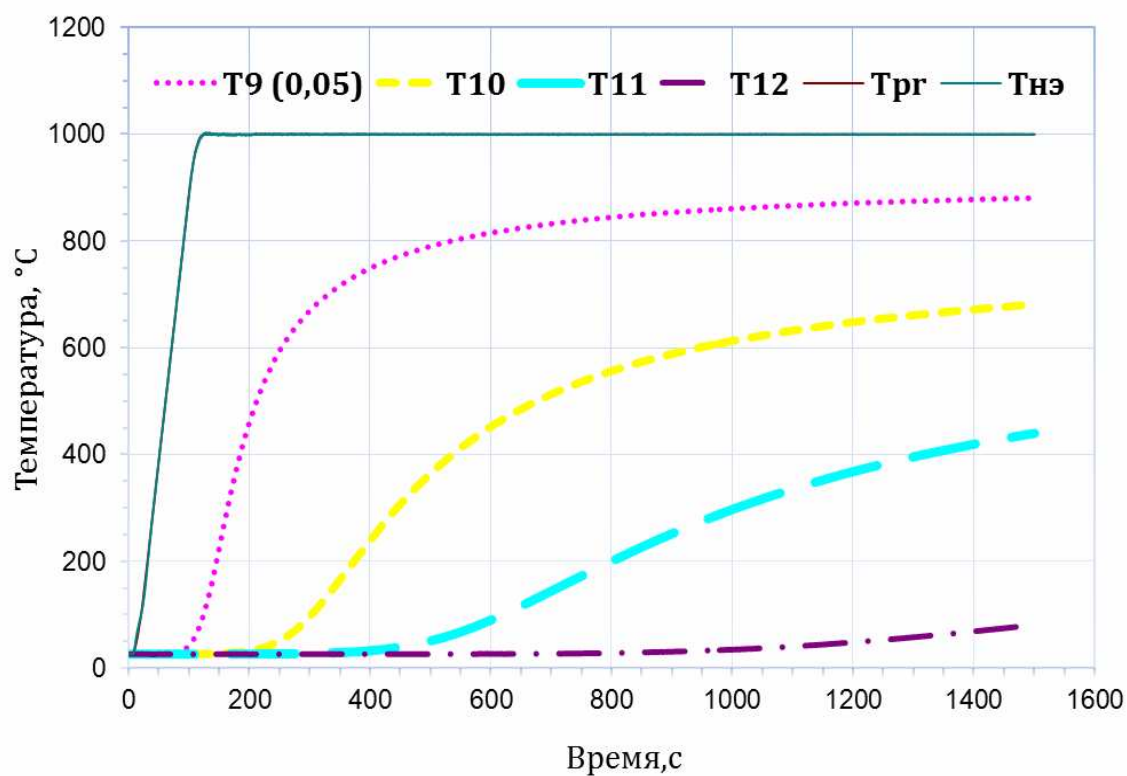


Рис. 4.27 Результаты теплового испытания №6 образца В, этап 2, режим №1

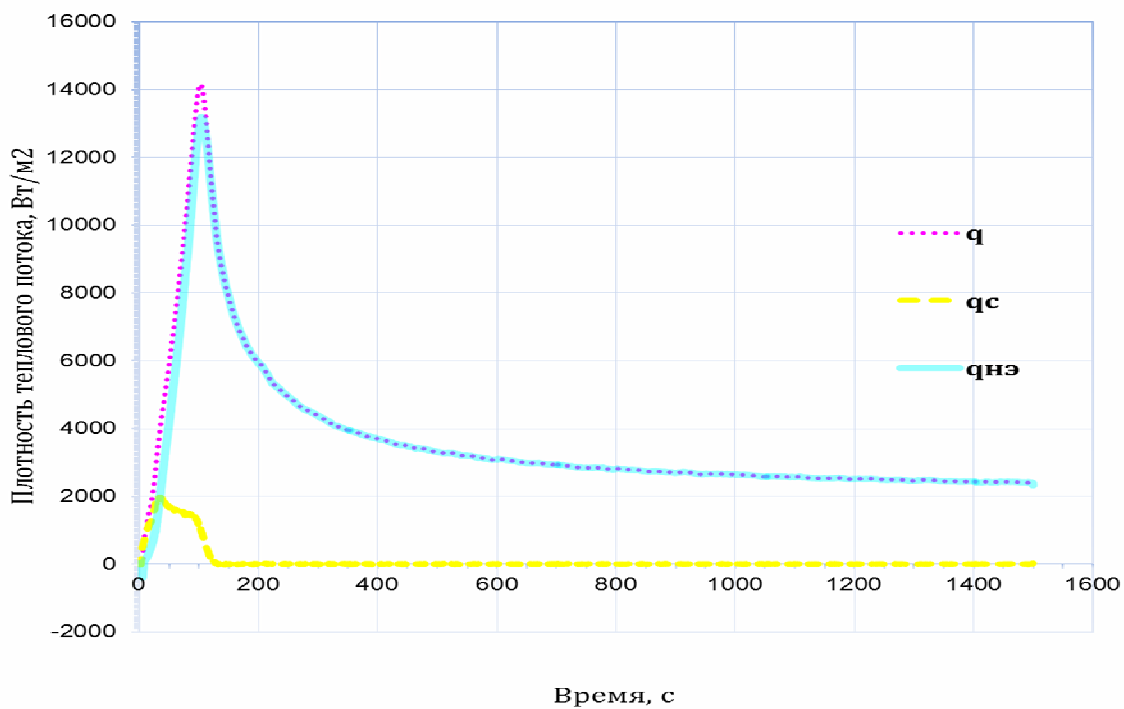


Рис. 4.28 Изменение плотности теплового потока на поверхности НЭ
в испытании №6,

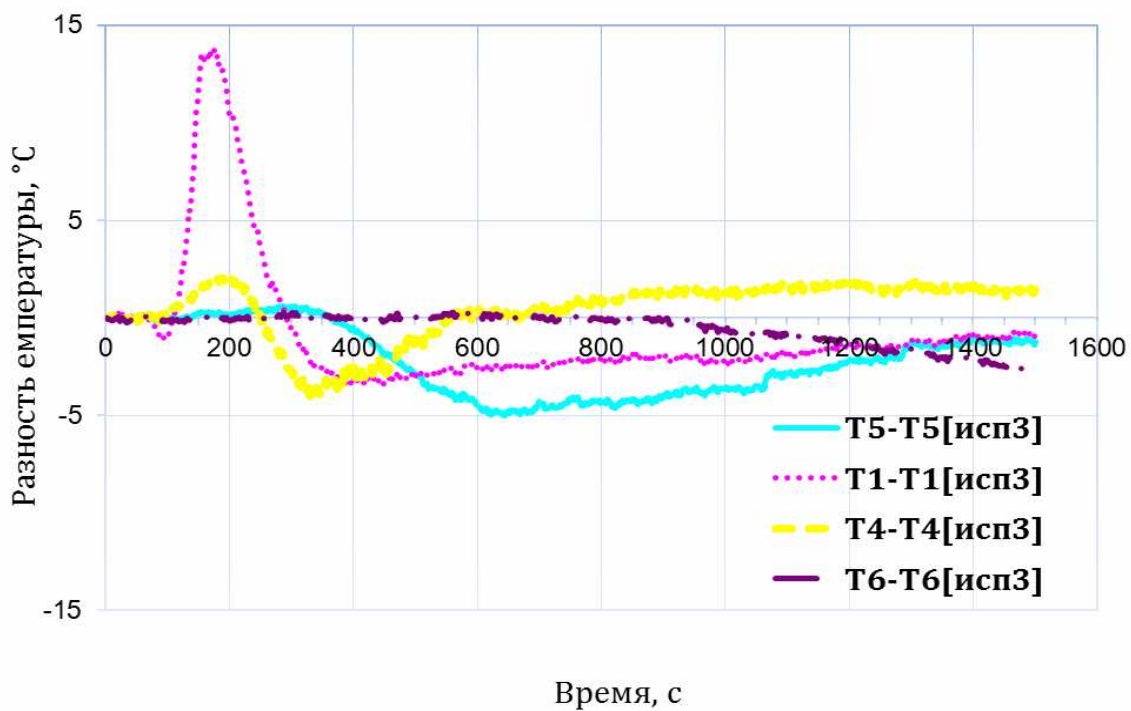


Рис. 4.29 Разность температур термограмм в испытаниях №6 и №3,
образца А, этап 2 (без ТП) и этап 1 (с ТП), режим №1

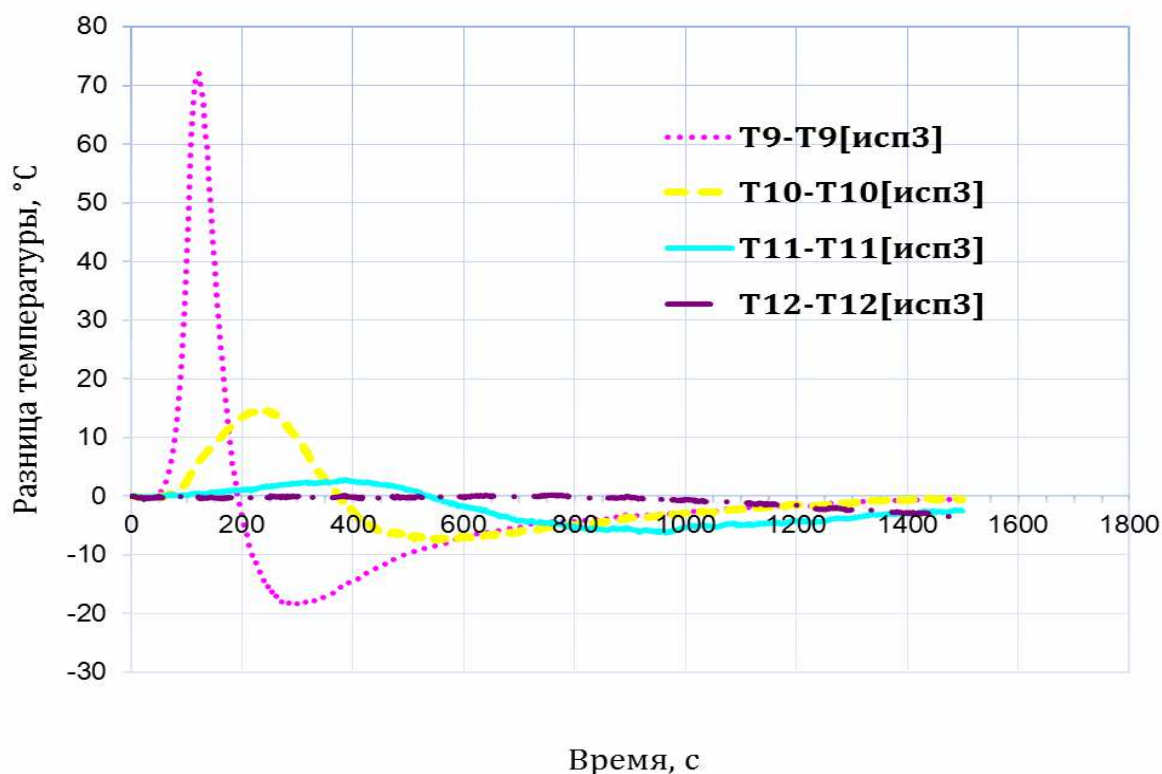


Рис. 4.30 Разность температур термограмм в испытаниях №6 и №3, образца В, этап 2 (без ТП) и этап 1 (с ТП), режим №1

4.4 Анализ результатов тепловых испытаний

Проведенные тепловые испытания образцов А и В материала ТЗМК-10 показали, что:

После серии испытаний на режимах нагрева №1 и №2 на нагреваемых поверхностях образцов не наблюдается заметных следов разрушения (рис. 4.31). Нагреваемые поверхности образцов изменили свой цвет с белого на серый, что связано с взаимодействием материала образцов с металлом НЭ. Рисунок зоны контакта НЭ с поверхностью образца указывает на хороший тепловой контакт рабочей зоны НЭ с образцом, что позволяет говорить о реализации кондуктивного нагрева в рабочей зоне. Темные пятна в области установки лабиринтных замков на натяжных рамках связаны с осаждением продуктов разложения электроизолирующего кембрика из фторопласта в процессе сушки и прожига

экспериментальной сборки в условиях вакуума на этапе предварительных испытаний.

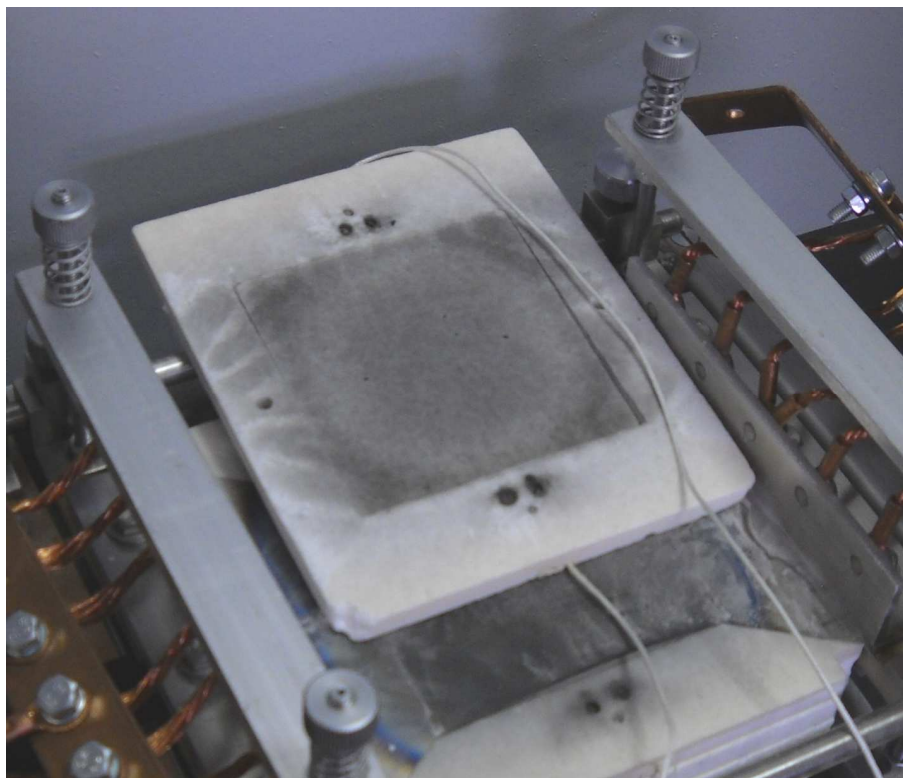


Рис. 4.31 – Нагреваемая поверхность образца А после серии испытаний на режимах №1 и №2

Характер изменения давления в вакуумной камере в диапазоне $7,0 \times 10^{-5} \div 1,0 \times 10^{-4}$ бар во время штатных испытаний свидетельствует об отсутствии выделения газообразных продуктов из материала образца. Указанное изменение давления практически не влияет на теплопроводность материала образцов.

Во всех испытаниях удалось достаточно хорошо реализовать заданные программы нагрева, как на режиме №1 с темпом $\sim 10^\circ\text{C}/\text{с}$, так и на режиме №2 с темпом $\sim 2^\circ\text{C}/\text{с}$ на начальном участке. На режиме №1 экспериментальные образцы и датчики теплового потока прогревались быстрее по сравнению с режимом №2.

Во всех испытаниях значения температуры в точках измерений на образце А, и в датчике плотности теплового потока DA, установленном на этом образце, были выше чем температуры в соответствующих точках измерений на образце В

и соответствующем датчике DB. Это связано с различием в толщине секций образцов А и В, и различием в толщине датчиков DA и DB. Все элементы образца А и датчика DA были тоньше соответствующих элементов образца В и датчика DB. Общая толщина экспериментальной сборки образца А была всего на 1,7% тоньше экспериментальной сборки образца В. При этом температура на обратных поверхностях экспериментальныхборок отличалась незначительно, что позволяет говорить о хорошей симметричности схемы тепловых испытаний.

В испытании №1 (режим нагрева №2) в образце А характер взаимного расположения графиков температуры целевых термопар Т1 (Ø 0,05мм, сварка «встык»), Т2 (Ø 0,1мм, сварка «встык») и Т3 (Ø 0,2мм, сварка «с корольком», диаметр королька термопары Ø 0,45мм), установленных на одинаковом расстоянии от нагреваемой поверхности образца, изменяется во время нагрева (см. рис.4.13 и 4.15). Вначале до 600с (Т~400°C) самая тонкая термопара Т1 фиксирует температуру большую, чем самая толстая термопара Т3 (разница температур до 3°C). А затем положение меняется, и самая толстая термопара фиксирует температуру большую, чем самая тонкая термопара (разница до 15 °C). Термопара Т2 также вначале до момента времени 1450с (Т~850°C) фиксирует температуру выше чем тонкая термопара Т1 (разница температур до 12 °C), а затем начинает фиксировать меньшую температуру. При этом характер изменения разности температур отслеживает характер изменения темпа нагрева.

В испытании №1 (режим нагрева №2) в образце В характер взаимного расположения графиков температуры целевых термопар Т7 (Ø 0,2мм сварка «с корольком» диаметр королька термопары Ø 0,6мм), Т8 (0,1мм сварка «встык») и Т9 (0,05мм, сварка «встык»), установленных на одинаковом расстоянии от нагреваемой поверхности образца, также изменяется во время нагрева (рис. 4.14 и 4.15). Вначале до 500с (Т~220°C) самая тонкая термопара Т9 фиксирует температуру большую, чем самая толстая термопара Т7 (разница температуры до 2°C). А затем положение меняется, и самая толстая термопара фиксирует температуру большую, чем самая тонкая термопара (разница до 18 °C). Термопара

Т8 все время фиксирует температуру выше чем тонкая термопара Т9 (разница температуры до 5 °С ($\tau=1450\text{с}$)).

В испытании №3 (режим нагрева №1) в образце А характер взаимного расположения графиков температуры целевые термопар Т1 (Ø 0,05мм, сварка «встык»), Т2 (Ø 0,1мм, сварка «встык») и Т3 (Ø 0,2мм, сварка «с корольком», диаметр королька термопары Ø 0,45мм), установленных на одинаковом расстоянии от нагреваемой поверхности образца, изменяется во время нагрева (см. рис. 4.17 и 4.19). Вначале до 120с ($T\sim 250^\circ\text{C}$) самая тонкая термопара Т1 фиксирует температуру большую, чем самая толстая термопара Т3 (разница температуры до 22°C). А затем положение меняется, и самая толстая термопара фиксирует температуру большую, чем самая тонкая термопара (разница до 15°C). Термопара Т2 также вначале до момента времени 1000с ($T\sim 850^\circ\text{C}$) фиксирует температуру выше чем тонкая термопара Т1 (разница температур до 30°C), а затем начинает фиксировать меньшую температуру. При этом характер изменения разности температуры отслеживает характер изменения темпа нагрева.

В испытании №3 (режим нагрева №1) в образце В характер взаимного расположения графиков температуры целевых термопар Т7 (Ø 0,2мм сварка «с корольком» диаметр королька термопары Ø 0,6мм), Т8 (0,1мм сварка «встык») и Т9 (0,05мм, сварка «встык»), установленных на одинаковом расстоянии от нагреваемой поверхности образца, также изменяется во время нагрева (см. рис. 4.18 и 4.19). Вначале до 270с ($T\sim 600^\circ\text{C}$) самая тонкая термопара Т9 фиксирует температуру большую, чем самая толстая термопара Т7 (разница температур до 28°C). А затем положение меняется, и самая толстая термопара фиксирует температуру большую, чем самая тонкая термопара (разница до 17 °С). Термопара Т8 также вначале до момента времени 280с ($T\sim 700^\circ\text{C}$) фиксирует температуру выше чем тонкая термопара Т9 (разница температур до 10°C), а затем начинает фиксировать меньшую температуру. При этом характер изменения разности температур отслеживает характер изменения темпа нагрева.

Различия в показаниях целевых термопар с разным диаметром проводов при различных режимах (темпах) нагрева, приведенные выше, связаны с

процессами теплообмена в зоне установки термопар и обусловлены равнонаправленными эффектами, в частности: большей теплоемкостью более массивных термопар, большим отводом тепла по более толстым термопарным проводам при относительно невысоких температурах и большим нагревом более толстых термопар за счет радиационного теплообмена при более высоких температурах в полупрозрачном материале, которым является ТЗМК-10. При этом на процессы теплообмена могут влиять: темп нагрева и степень черноты спая термопары.

В испытаниях №4 и №6, проведенных на режимах нагрева №1 и №2, но с удаленными из образца А наиболее толстыми целевыми термопарами Т2 и Т3 и из образца В целевыми термопарами Т7 и Т8 наблюдается сходное по характеру изменение поля температуры в экспериментальных сборках образцов. Это изменение связано с влиянием на поле температур факта удаления термопар (рис. 4.24 - 4.25 и 4.29 – 4.30)

При сравнении зависимостей от времени разности температуры в точках измерений в экспериментальных сборках образцов А и В на режиме нагрева №2, полученных в испытании №1 (с целевыми ТП), и в испытании №6 (без двух удаленных целевых термопар) для обоих экспериментальныхборок образцов А и В наблюдаются практически совпадающие зависимости от времени упомянутых разностей для термопар Т1, Т4, Т5 и Т6 на образце А и Т9, Т10, Т11 и Т12 на образце В, соответственно. Но в данном случае характер изменения разностей отличается от случая сравнения испытаний №1 и №4 (см. рис. 4.29 и 4.30). Вначале наблюдается более высокая температура для испытания с целевыми ТП, а затем более высокая температура наблюдается для испытания без двух наиболее толстых целевых термопар. Для оставшихся в образцах целевых термопар Т1 и Т9 наблюдается такой же характер изменения разностей, но с существенно разным уровнем максимальных температур в образцах А и В. При этом для термопар расположенных на большем расстоянии от нагреваемой поверхности точка перехода разности температур через нулевое значение смещается в сторону большего

Наличие достаточно массивных (толстых) целевых термопар в исследуемых образцах приводит к повышению температур в точках измерений в образцах А и В и датчиках DA и DB на начальном участке нагрева при относительно невысоких температурах в точке размещения целевых термопар и к снижению этих температур при высоких значениях температур в точке размещения целевых термопар. Величина упомянутого повышения температуры зависит от темпа нагрева. Это связано с процессами теплообмена в зоне установки целевых термопар и обусловлено разнонаправленными эффектами, в частности: теплоемкостью массивных целевых термопар, отводом тепла по термопарным проводам и нагревом целевых термопар за счет радиационного теплообмена при более высоких температурах в полупрозрачном материале, которым является ТЗМК-10.

Результаты проведенной серии тепловых испытаний на режимах нагрева №1 и №2, включая термограммы и зависимости от времени плотности тепловых потоков на поверхности НЭ продемонстрировали достаточно хорошую повторяемость. Учитывая хороший контакт между НЭ и нагреваемыми поверхностями образцов, возможно принять равными температуру НЭ и температуры нагреваемых поверхностей образцов А и В, а также плотность теплового потока на поверхности НЭ и на нагреваемых поверхностях образцов. Данные характеристики теплового нагружения поверхности образцов можно использовать в качестве граничных условий при решении задач математического моделирования поля температур в образцах и задач определения ТФХ исследуемого материала.

С целью повышения точности последующей обработки, расширения возможностей анализа и интерпретации результатов проводимых исследований в данных тепловых испытаниях образцов высокопористого волокнистого материала ТЗМК-10, были разработаны и реализованы методики и технологии, направленные на максимальное снижение влияния неопределенностей в условиях испытаний, ТФХ материала образцов, схемах измерений и др. на результаты испытаний.

Выводы по главе 4

1. Результаты проведенных экспериментальных исследований и их анализ показали, что в условиях высоких уровней температуры и темпа нагрева термопары диаметром больше 50 мкм создают значительное возмущение теплового поля и влияют на показания соседних термопар

2. Полученные в испытаниях результаты позволяют на этапах дальнейшей обработки данных экспериментальных исследований решать задачи математического моделирования поля температур в образцах с установленными термопарами и без термопар, определять (уточнять) ТФХ исследуемого материала из решения соответствующих ОЗТ. Уточнение ТФХ материала позволяет более корректно решить задачи моделирования поля температуры и оценки влияния термопар на поле температуры в исследуемых образцах.

Глава 5. Интерпретация результатов моделирования и экспериментальных данных

5.1. Результаты математического моделирования

Исходные данные для моделирования прогрева образца материала ТЗМК-10 выбирались в соответствии со следующими условиями:

1) Форма пластин образующих образец – прямоугольный параллелепипед с одинаковой длиной и шириной.

2) Размеры пластин 1 и 2: Длина – 100 мм, Ширина – 100 мм, Толщина – 10 мм. (выбираются из условия обеспечения одномерности модели теплопереноса вдоль оси X. Длина и ширина ≥ 10 толщин). Количество пластин -3. Размер прижимной пластины по толщине – 20 мм.

3) Начальные и граничные условия:

- Начальные условия $T(x,0) = T_{\text{комнатная}} \approx 25^\circ\text{C}$,

- Граничное условие на нагреваемой поверхности: $T(0,\tau)$, $(0 \leq \tau \leq \tau_k)$ в соответствии с режимом нагрева ,

- Граничное условие на обратной поверхности пластины : $T(b,\tau) = \text{const} = 25^\circ\text{C}$, $(0 \leq \tau \leq \tau_k)$.

4) Теплофизические характеристики материала ТЗМК-10 брались из таблицы 2.2 для случая $P=4,0 \times 10^{-5}$ атм.

5) Условия и режимы нагрева образца - радиационно-кондуктивный нагрев поверхности образца в условиях вакуума при давлении 4×10^{-5} бар для двух режимов нагрева, соответствующих экспериментальным (рис.5.1):

Режим №1 – линейный закон с темпом $\approx 10^\circ\text{C}/\text{с}$ и полкой $T_{\text{max}} = 1000^\circ\text{C}$

Режим №2 – Точка на поверхности ВКС «Буран» с $T_{\text{max}} \sim 1000^\circ\text{C}$

Моделировался плоский слой теплозащитного покрытия ТЗМК-10, нагреваемый радиационно-кондуктивным тепловым потоком q , обеспечивающим на нагреваемой фронтальной стороне образца заданный тепловой режим.

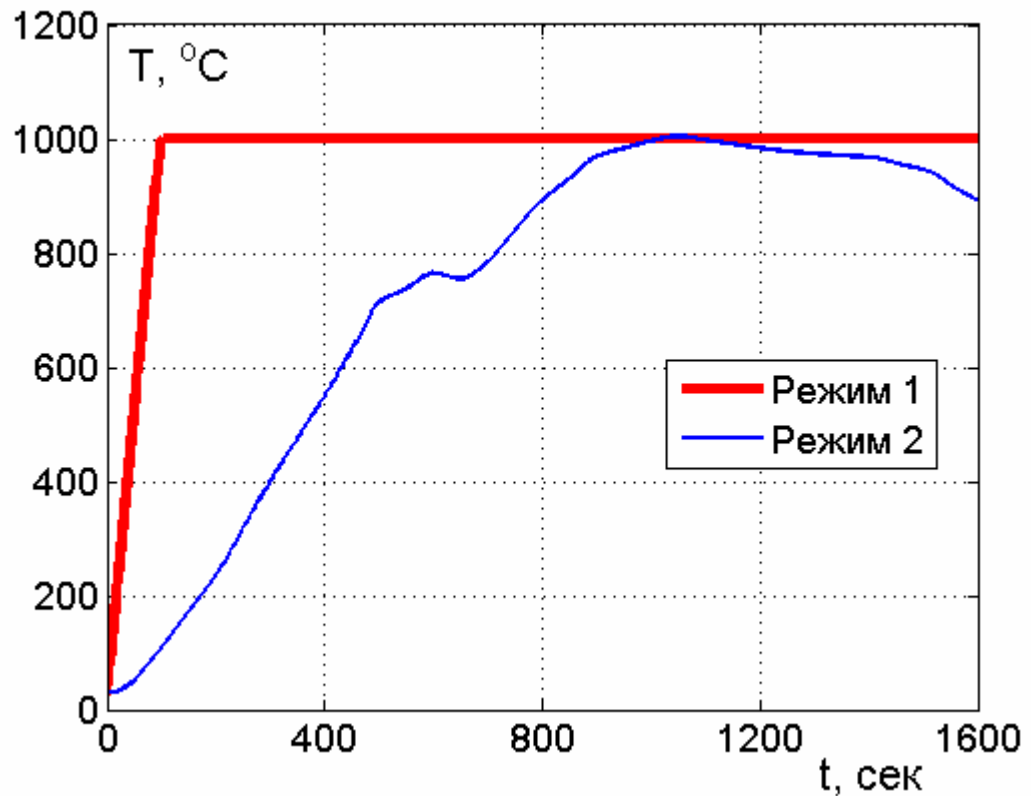


Рис.5.1 Тепловые режимы для двух вариантов прогрева образцов

Для практической реализации метода в рабочей среде MATLAB был подготовлен комплекс программ и проведено моделирование теплового состояния образцов материала ТЗМК-10 с учетом теплофизических характеристик материала и алгоритма, разработанного в рамках данных исследований. Некоторые результаты расчетов прогрева образца в осевом сечении пластины материала с размерами 10x10x30 мм, приводятся на рис. 5.2-5.3 Подобные результаты наглядно демонстрирует эволюцию теплового состояния образцов пористых полупрозрачных материалов в местах установки контактных датчиков температуры. Кроме того, видимое из графиков увеличение запаздывания нагрева слоев материала, находящихся на большем удалении от нагревательного элемента, может, в частности, использоваться при решении некоторых задач инженерной физики, например, при создании новых теплоизолирующих элементов, применяемых как в космической технике, так и в машиностроении.

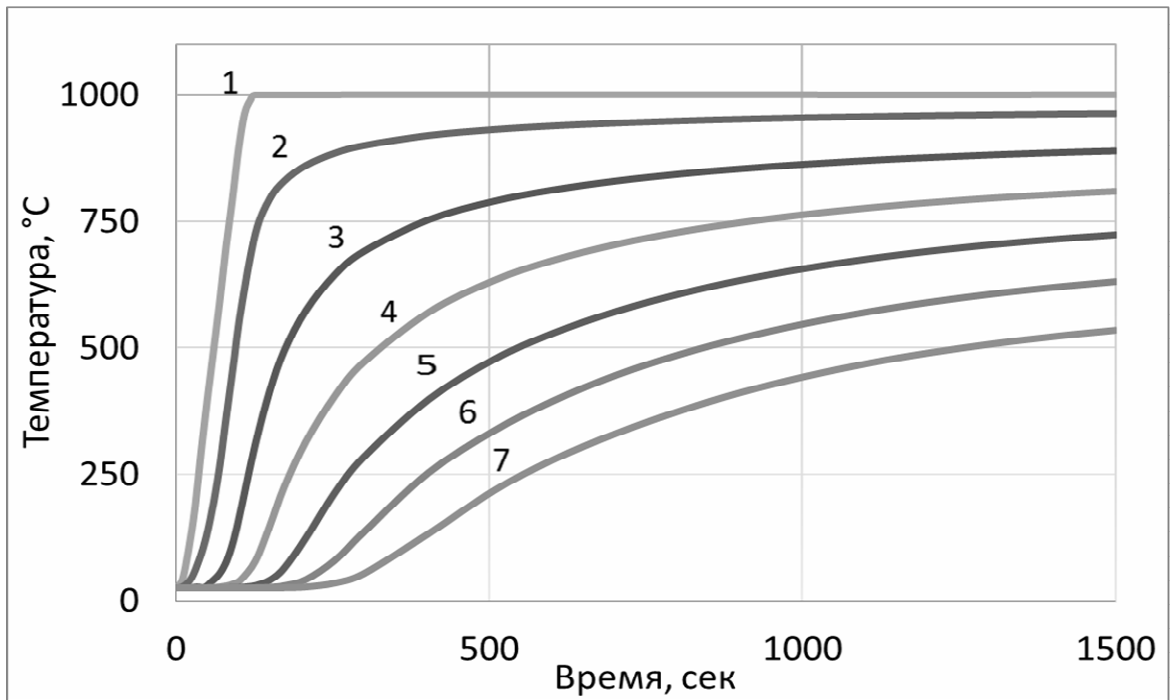


Рис. 5.2 – Температурное поле внутри образца ТЗМК-10, соответствующее режиму нагрева 1:

1- Температура на поверхности нагревательного элемента (НЭ), 2-7 - температуры на глубине 5, 10, 15, 20, 25 и 30 мм от НЭ соответственно.

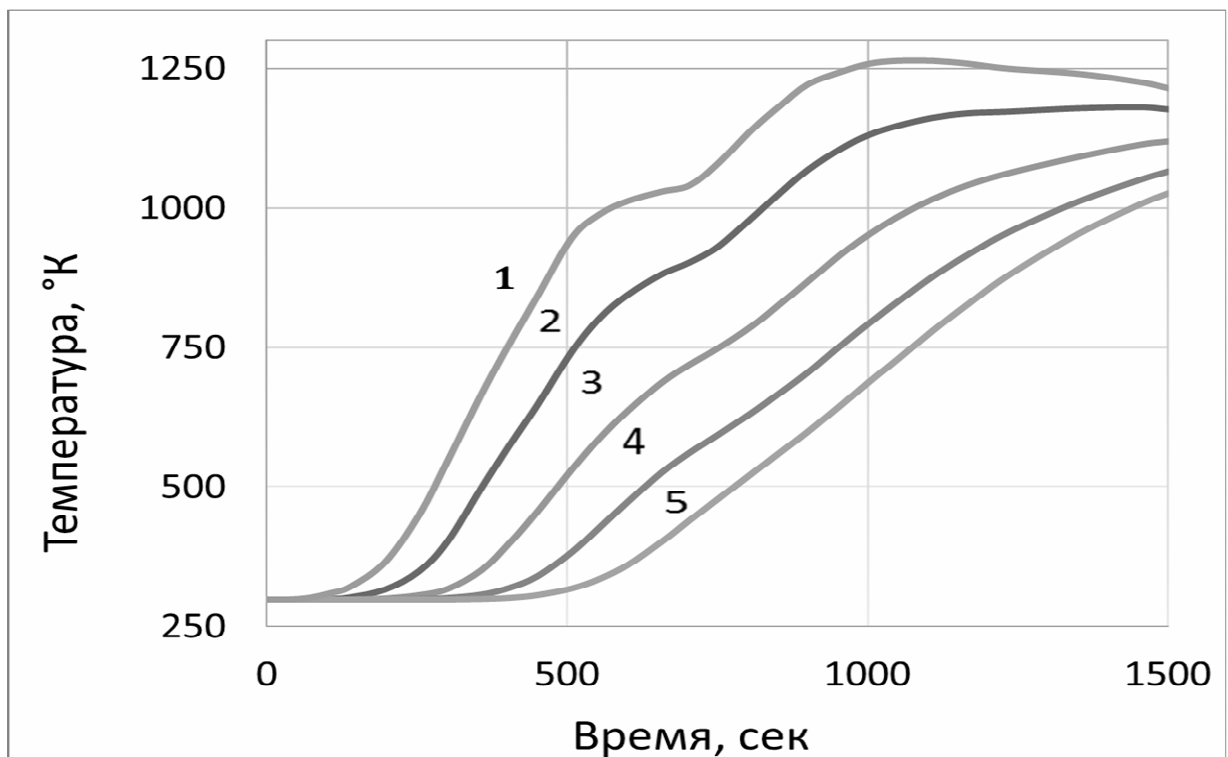


Рис. 5.3 – Температурное поле внутри образца ТЗМК-10, соответствующее режиму нагрева 2:

1 - Температура на поверхности нагревательного элемента (НЭ), 2 –5 – температура на глубине 6, 12, 18 и 24 мм от НЭ соответственно

Проведенные расчеты по определению температурного поля внутри исследуемого образца создают хорошую основу для анализа погрешности экспериментального определения теплового состояния теплозащитного материала и позволяют решать вопросы планирования эксперимента.

5.2 Сравнительный анализ результатов теоретического и математического исследования.

После серии экспериментальных исследований внутреннего состояния теплонагруженных образцов были получены данные для вторичной обработки результатов математического моделирования с учетом исходных условий экспериментального исследования.

Так, были скорректированы режимы нагрева для двух вариантов испытаний, получены данные о граничных условиях на обратных поверхностях прогреваемых образцов, данные о тепловых потоках внутри и на поверхности следуемых материалов. Новые характеристики были заложены в программный алгоритм, написанный в рабочей среде MATLAB, с целью верификации и отслеживания погрешностей измерений тепловых испытаний

Сравнительный анализ прогрева экспериментального образца в контрольных точках (Т1, Т4, Т5 – термопары диаметром 0,05 мм, расположенные на глубине 10, 20 и 30 мм соответственно для режима нагрева №1 (испытание №6) и данных математического моделирования с теми же начальными параметрами и граничными условиями, как и в экспериментальном исследовании, представлены на рис. 5.4

Отличия показаний термопар ΔT в экспериментальном и математическом исследовании образца высокопористого теплозащитного материала ТЗМК-10 приведены на рис. 5.5. Под величиной ΔT здесь и далее подразумевается разность показаний тепловых датчиков и значений температуры, полученных в точках расположения термопар при математическом моделировании.

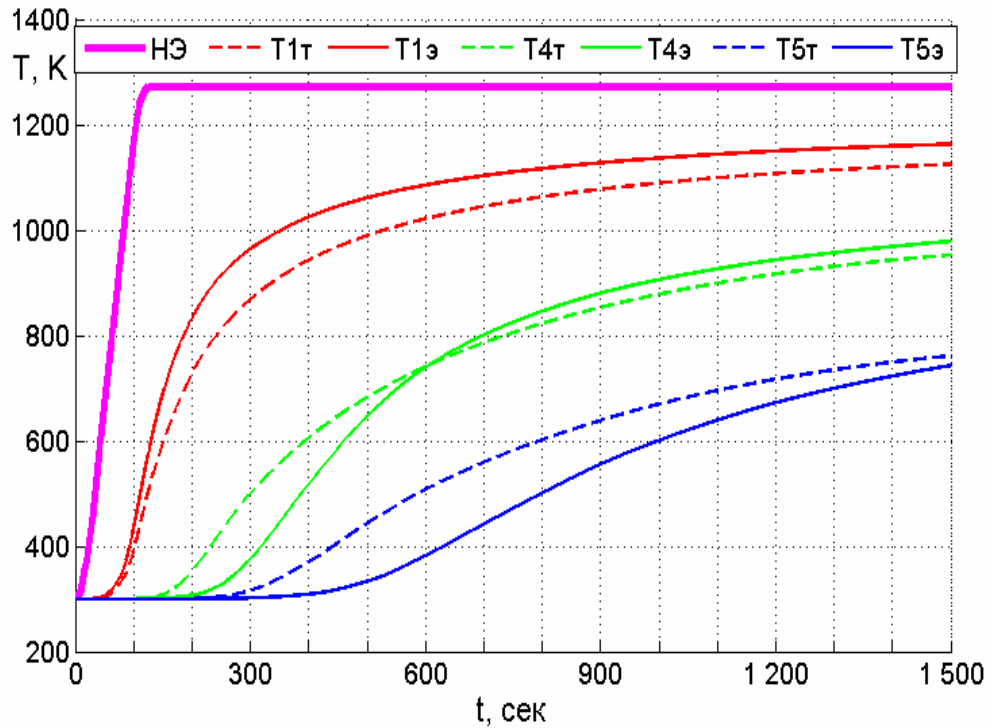


Рис.5.4 Температурное поле внутри исследуемого материала ТЗМК-10. Сравнительный график результатов математического моделирования и экспериментального исследования. Режим №1

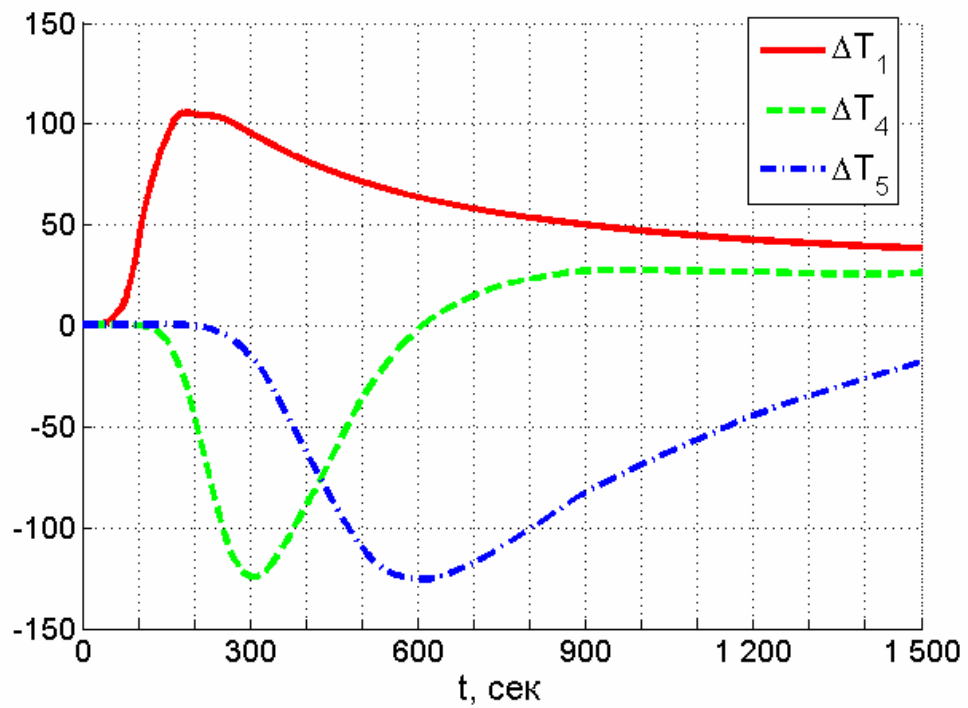


Рис.5.5 Разница показаний термодатчиков в контрольных точках. Режим 1

На рис. 5.4-5.5 видно, что имеется отличие экспериментальных и рассчитанных значений температуры. В точках, расположенных относительно близко к нагревательному элементу, экспериментальные значения, как правило, превышают соответствующие теоретические. Однако, с продвижением «вглубь» материала в сторону холодной границы, экспериментальные значения температуры становятся ниже соответствующих теоретических. Кривые, демонстрирующие погрешности ΔT подобны, однако, не во всех случаях совпадает знак погрешности.

Сравнительный анализ прогрева экспериментального образца в контрольных точках (T_1 , T_4 , T_5 – термопары диаметром 0,05 мм, расположенные на глубине 10, 20 и 30 мм соответственно для режима нагрева №2 (испытание №4)) и данных математического моделирования с теми же начальными параметрами и граничными условиями, как и в экспериментальном исследовании, представлены на рис. 5.6.

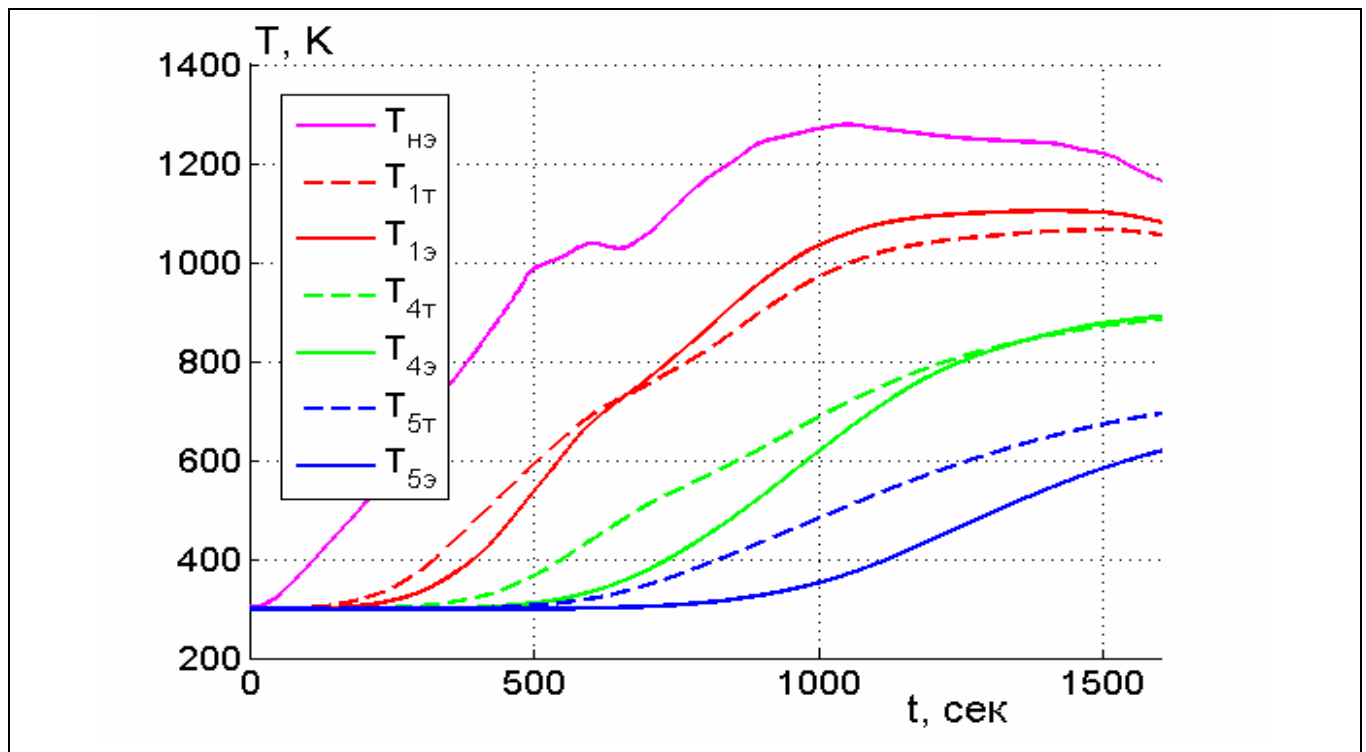


Рис. 5.6 Температурное поле внутри исследуемого материала ТЗМК-10. Сравнительный график результатов математического моделирования и экспериментального исследования. Режим №2

Отличия показаний термопар ΔT в экспериментальном и математическом исследовании образца высокопористого теплозащитного материала ТЗМК-10 приведены на рисунке 5.7.

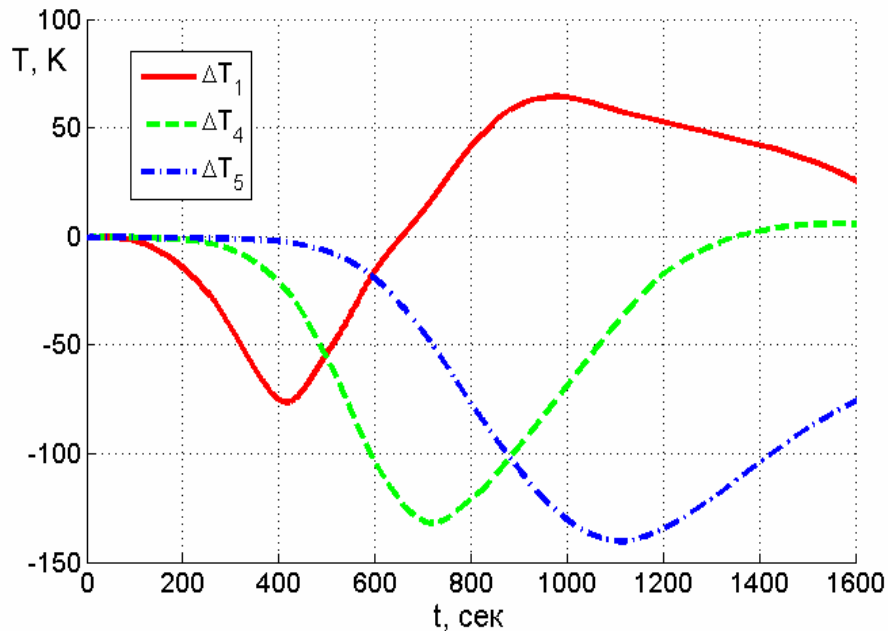


Рис.5.7 Разница показаний термодатчиков в контрольных точках. Режим 2

Как видно из рис. 5.6-5.7 на графиках так же присутствует разница в значениях температуры между экспериментальной и теоретической кривой.

Характер погрешности измерений для режима нагрева №2 повторяет характер погрешностей температуры в контрольных точках для режима №1

Данные эффекты могут быть обусловлены влиянием нескольких факторов:

- воздействие кондуктивных тепловых потоков, связанных с термосопротивлением в зоне контакта «термопара-материал»
- воздействие радиационных тепловых потоков
- отвод тепла по электродам термопары
- нарушение целостности структуры материала

Стоит обратить внимание на то, что значения абсолютной погрешности с течением времени устанавливаются и приблизительно сходятся к одному значению.

5.3. Обоснование математической модели

Для выявления закономерности в представленных графиках стоит более детально рассмотреть вопрос влияния тепловых потоков на результаты измерений, т.к. при проведении экспериментальной отработки были использованы современные системы контроля показаний датчиков и сборки экспериментального стенда, поэтому вопрос о качестве проведения эксперимента не рассматривается.

На рис. 5.8 представлены значения полного коэффициента теплопроводности для материала ТЗМК-10 в условиях нагрева в вакууме, так же представлено разложение эффективной теплопроводности на составляющие: радиационную и кондуктивную теплопроводность [64.]

Как видно из графика, начиная от температуры 300°C и выше экспоненциально возрастает радиационная составляющая теплопроводности, что, возможно сказывается и на погрешности измерений. Рассмотрим этот вопрос более детально.

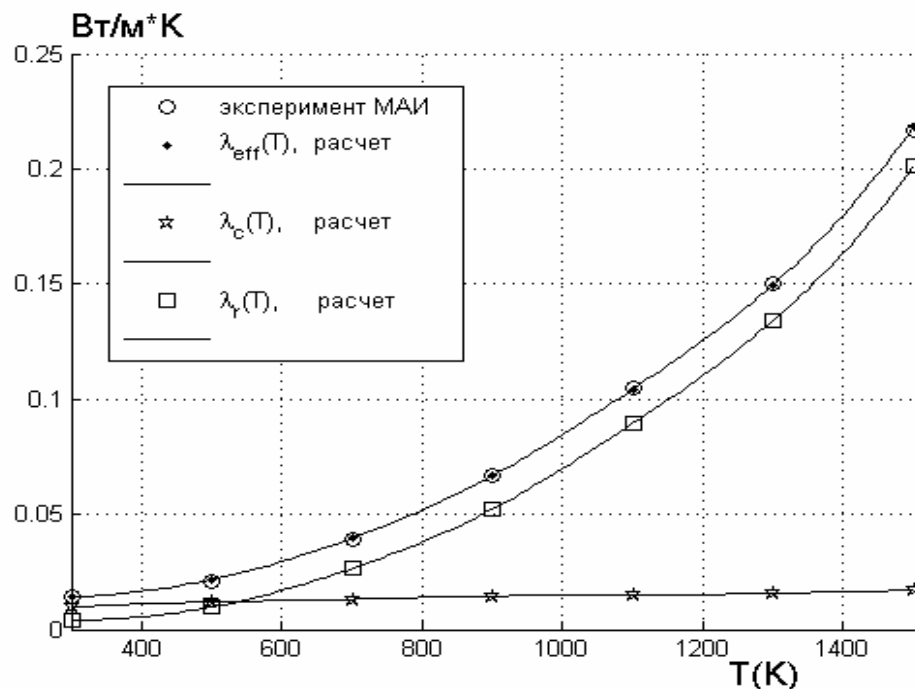


Рис. 5.8. Радиационная и кондуктивная составляющие полной теплопроводности для материала ТЗМК-10

В слоях материала, расположенных на более близком расстоянии от нагревательного элемента, действия радиационных потоков практически напрямую доходит до мест установки термопар, что обусловлено быстрым темпом нагрева и физическими характеристиками материала (волокнистый пористый материал), следовательно, термопара прогревается быстрее, тем самым завышая истинный показания температурного поля в исследуемом образце. Этот эффект заметен на рис.5.4. и 5.6. для кривых, соответствующих местам установки термопары Т1.

Для слоев материала, расположенных на некотором «среднем» удалении от нагревательного элемента (термопара Т4, расположенная на глубине 20 мм от НЭ), показания экспериментальных исследований отстают от расчетных. Данный эффект может быть обусловлен срабатыванием термосопротивления в зоне контакта, но радиационная теплопроводность по-прежнему превалирует.

На глубине 30 мм в месте установки термопары Т5 радиационный поток не успевает дойти, т.к. большую часть тепловой энергии забирают первые слои материала. В связи с этим, экспериментальные данные всегда отстают от расчетных, однако, ближе к концу режима прогрева заметна тенденция схождения графиков, что опять же, обусловлено радиационной составляющей теплопроводности и температурой, при которой ее воздействие становится ощутимо заметно.

Попробуем связать влияние радиационной и кондуктивной компоненты полной теплопроводности с тепловыми потоками, действующими в местах установки термопар и погрешностями измерений.

На рис.5.9-11 представлены совместные графики для режима нагрева №1 для полной плотности теплового потока, отдельных ее составляющих (радиационной и кондуктивной компоненты) и погрешности измерения в соответствующей контрольной точке. Так же дополнительно представлены зависимости для разности кондуктивного и радиационного потока. Погрешность измерения ΔT представлена в увеличенном масштабе для более наглядного сопоставления ее с величиной теплового потока.

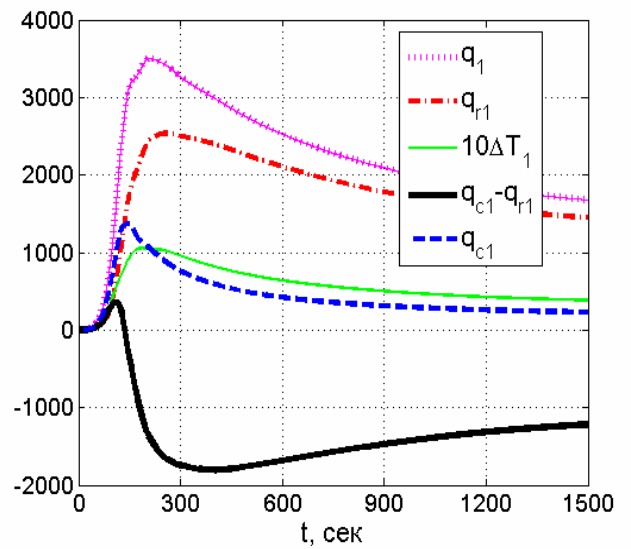
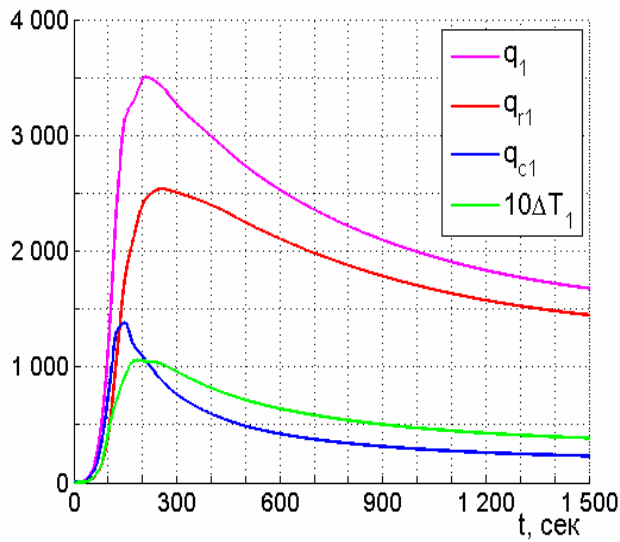


Рис.5.9 Тепловые потоки в точке T1. Режим 1.

Разность кондуктивного и теплового потока для первой контрольной точки T1.

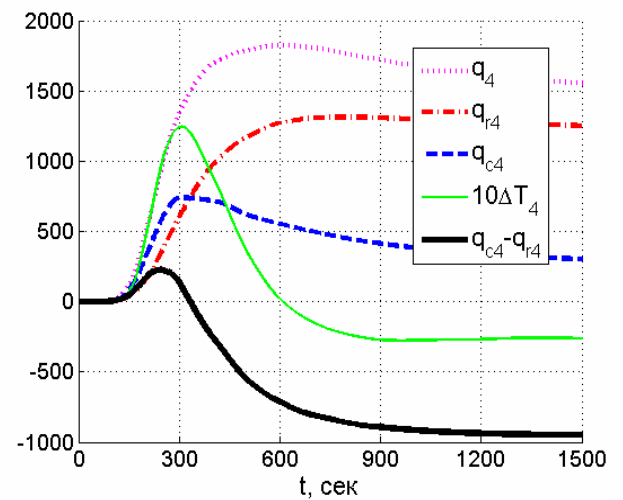
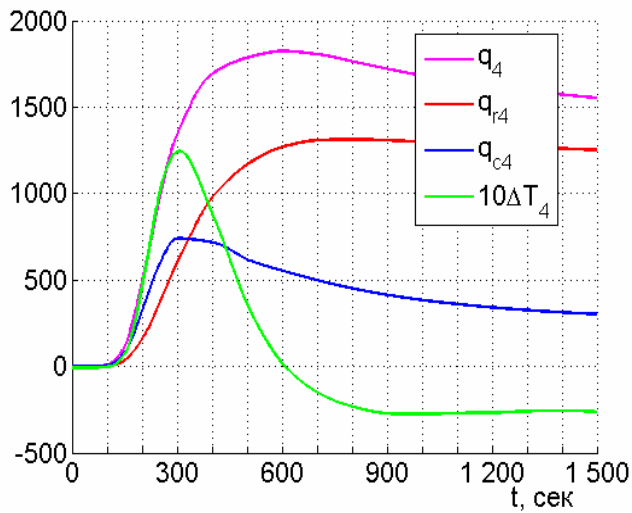


Рис.5.10 Тепловые потоки в контрольной точке T4. Режим 1

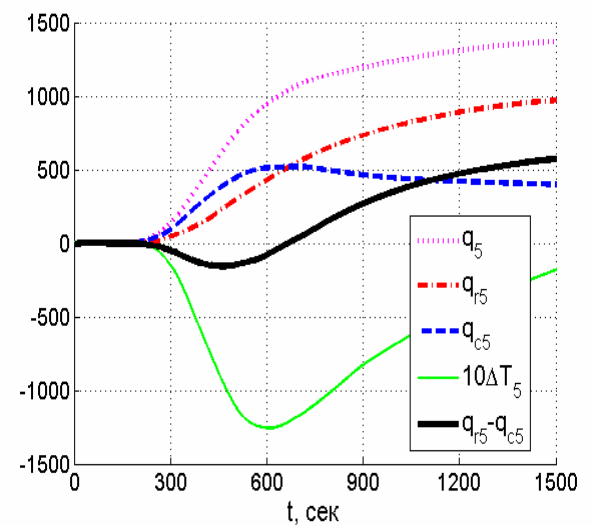
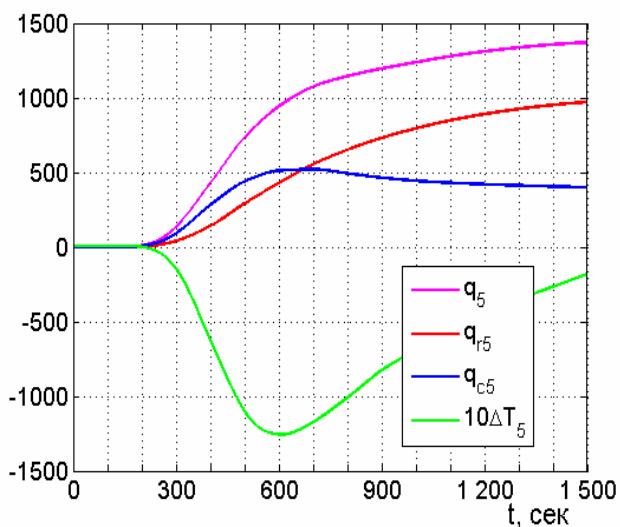
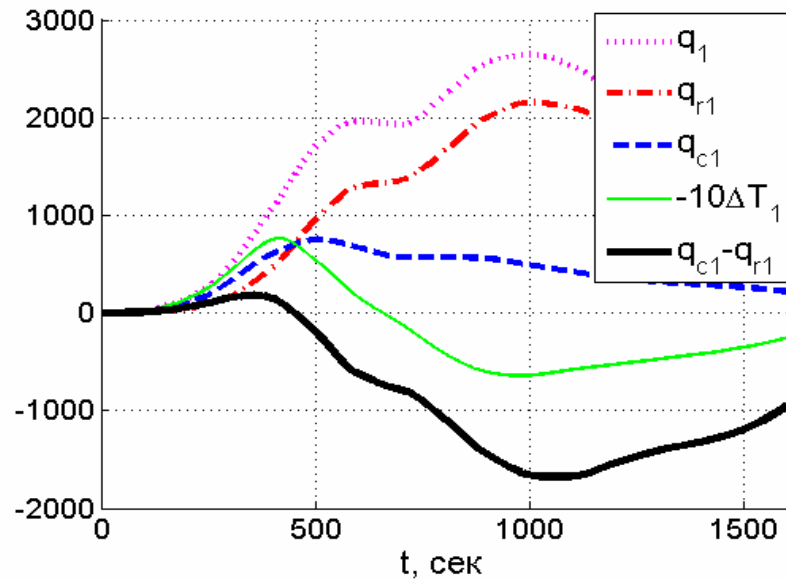
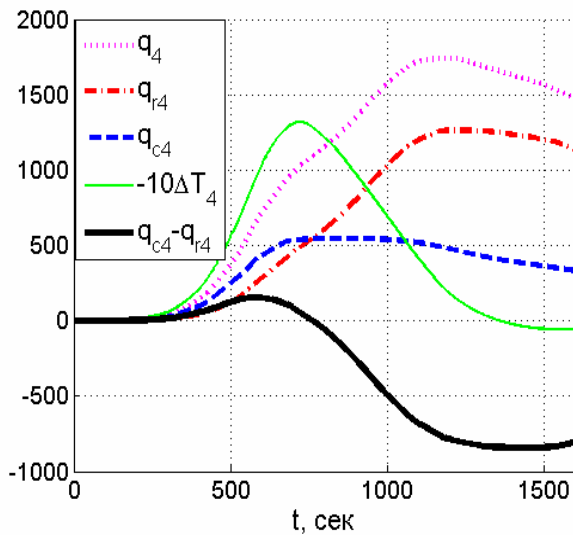


Рис. 5.11 Тепловые потоки в контрольной точке T5. Режим 1

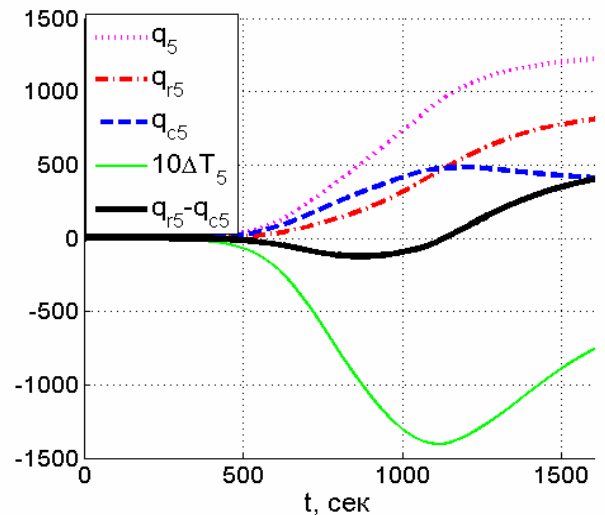
Такой же анализ был проведен для режима испытания №2. Графики для первой контрольной точки T1 представлены на рис. 5.12. Для второй и третьей контрольных точек T4 и T5 на рис. 5.13-14.



5.12. Разность кондуктивного и радиационного теплового потока для первой контрольной точки T1. Режим №2



5.13 Разность кондуктивного и радиационного потока для второй контрольной точки T4. Режим №2



5.14 Разность кондуктивного и радиационного потока для третьей контрольной точки T5. Режим №2

Приведенные графики наглядно демонстрируют подобие эволюционных зависимостей погрешности и разности плотностей кондуктивного и

радиационного теплового потока. Это говорит о существовании двух «конкурирующих» разнонаправленных механизмов, изменяющих показания термопар: радиационный тепловой поток завышает показания термопары, наличие термосопротивления, влияющее на кондуктивный поток, показания термопары занижает.

Например, как следует из рис. 5.5, 5.7, наибольшие значения погрешности в показаниях термопар (до 148 градусов) достигаются в слоях более удаленных от НЭ при такой температуре, когда отсутствует влияние радиационной составляющей теплового потока. В этой области действие термосопротивления, существенно занижает собственную температуру термопары по сравнению с ее истинным значением, а завышающее показания термопары действие радиационного потока невелико. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшем исследовании подобных высокопористых материалов для корректировки результирующих показаний контактных датчиков температуры.

Поведение погрешности термопары T1 в режиме ударного нагрева существенно иное. Для режима №1 максимальное значение погрешности для контрольной точки T1, расположенной на расстоянии 10мм от НЭ, достигается на 200 секунде, в это же время (рис 5.9) достигается максимум плотности теплового потока на той же глубине, а температура в исследуемом слое равна приблизительно 700°C. Экспериментальные данные сильно превышают истинное значение температуры, что вызвано высоким темпом нагрева и достаточно быстрым включением влияния радиационной составляющей плотности теплового потока, которая из-за высокой пористости материала практически сразу начинает действовать. Погрешность показаний термопары T1 определяются поэтому не только составляющими локального теплового потока, но и определенной частью радиационного теплового потока НЭ, практически «напрямую», воздействующего на термопару.

В контрольных точках T4 и T5, расположенных на глубине 20 и 30 мм, соответственно, максимальные погрешности термопарных показаний достигают

130°. Так, первоначально экспериментальные показания в точке T5 существенно ниже по сравнению с результатами расчета, в силу воздействия термосопротивления, и в экспериментальной кривой проявляется своеобразный эффект «запаздывания». Однако, при достижении в этих слоях температуры включения радиационной компоненты теплового потока ($\approx 500\text{K}$) происходит выравнивание экспериментальной и теоретической кривой.

Для режима нагрева №2 наблюдается похожий характер поведения погрешностей измерения. Однако, из-за того, что в этом программном режиме нагрев имел более пологий характер, знак погрешности в слоях, расположенных ближе к НЭ, противоположен имеющемуся в режиме ударного нагрева: эта область дольше подвергается преобладающему воздействию кондуктивного теплового потока, т.к. воздействие его радиационной компоненты включается существенно позже. Данные условия усугубляют проблему корректного определения температуры в глубинных слоях, где практически на всем участке нагрева из-за термосопротивления в зоне контакта «термопара-образец» истинные значения. Представленные выше графики наглядно демонстрируют влияние разности показаний кондуктивного и радиационного теплового потока в соответствующей контрольной точке на искажения в показаниях термопар.

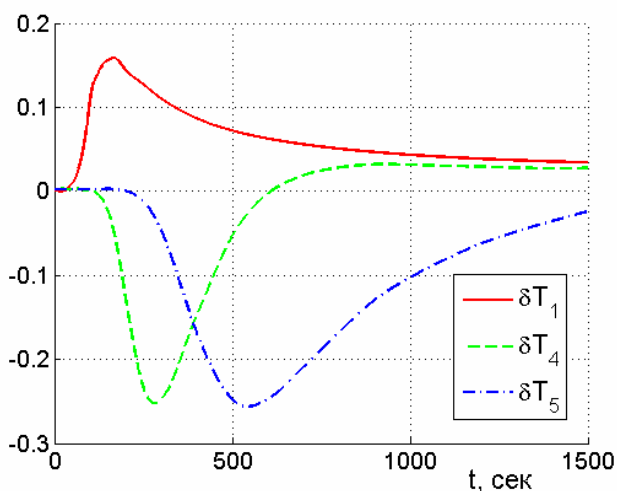


Рис. 5.15 Относительная погрешность в показаниях термопар для режима №1

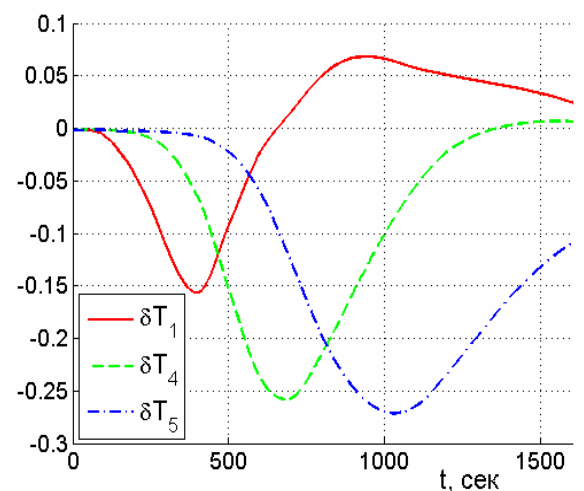


Рис. 5.16 Относительная погрешность в показаниях термопар для режима №2

На рис. 5.15-16 представлены графики относительных погрешностей в показаниях термопарных измерений в соответствующих точках для двух режимов нагрева. Как видно из рис. 5.15 -16 снижение влияния одного из этих механизмов воздействия на погрешности термопарных измерений (контактные термосопротивления и радиационный теплоперенос) увеличивает относительную погрешность показаний термопары. Так в глубинных слоях относительная погрешность в отдельные моменты времени может достигать 27%. Предельные значения относительной погрешности измерений температуры с помощью термопары на различных глубинах в значительной степени зависят от уровня и скорости теплового нагружения.

Полученные данные могут быть использованы при дальнейшем исследовании материалов подобного класса для внесения соответствующих поправок в результирующие показания термопарных датчиков.

Выводы по главе 5

Сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов математического моделирования показал, что:

- Основными механизмами, влияющими на уровень погрешности в показаниях контактных датчиков температуры, являются контактные термосопротивления в месте расположения термопары и опережающий нагрев термопары в результате радиационного теплопереноса. Эти механизмы создают противоположные по знаку отклонения собственной температуры термопары.
- При высоком темпе нагрева радиационный поток, созданный нагревателем, проникает в более глубокие слои высокопористого полупрозрачного материала и вносит дополнительное возмущение в тепловое состояние расположенных там термопар.
- Снижение влияния одного из этих механизмов увеличивает относительную погрешность показаний термопары. Так в глубинных слоях относительная погрешность в отдельные моменты времени достигала 27%. Предельные значения относительной погрешности измерений температуры с помощью термопары на различных глубинах в значительной степени зависят от уровня и скорости теплового нагружения.
- В области квазиустановившегося температурного поля относительные погрешности показаний термопар заметно снижаются – для ТЗМК-10 до уровня, не превышающего 4%.

Заключение

2. Определена и обоснована физическая модель для уточнения экспериментально-расчетной методики исследования физических свойств полупрозрачных высокопористых теплозащитных материалов. На этом этапе работы были выбраны геометрические характеристики образца, тип исследуемого материал для отработки данной методики в качестве примера, тип граничных условий и варианты режимов теплового нагружения.

3. Разработана математическая модель процессов радиационно-кондуктивного теплообмена в образце высокопористого частично прозрачного теплозащитного материала. Предложен и апробирован численный метод решения задачи радиационно-кондуктивного теплообмена и численный метод решения кинетической задачи переноса излучения в плоском слое частично прозрачного материала. По результатам сравнения с аналитическими решениями и анализа поведения невязки кинетического уравнения в процессе решения задачи была подтверждена высокая достоверность и точность численных методов.

4. Проведено планирование эксперимента и определена схема и методика температурных измерений. Получены и обоснованы конструктивно-технологические решения, позволяющие провести высокоточные экспериментальные исследования выбранного теплозащитного материала ТЗМК-10 на тепловакуумном стенде ТВС-2М с использованием специального экспериментального модуля ЭМ-2Т.

5. Проведены тепловые испытания образцов материала ТЗМК-10 с применением разработанной методики. Результаты проведенных экспериментальных исследований и их анализ показали, что в условиях высоких уровней температуры и темпа нагрева термопары диаметром больше 50 мкм

создают значительное возмущение теплового поля и влияют на показания соседних термопар. Их применение существенно затрудняет интерпретацию экспериментальных данных.

6. Сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов математического моделирования показал, что:

- Основными механизмами, влияющими на уровень погрешности в показаниях контактных датчиков температуры, являются контактные термосопротивления в месте расположения термопары и опережающий нагрев термопары в результате радиационного теплопереноса. Эти механизмы создают противоположные по знаку отклонения собственной температуры термопары.

- При высоком темпе нагрева радиационный поток, созданный нагревателем, проникает в более глубокие слои высокопористого полупрозрачного материала и вносит дополнительное возмущение в тепловое состояние расположенных там термопар.

- Снижение влияния одного из этих механизмов увеличивает относительную погрешность показаний термопары. Так в глубинных слоях относительная погрешность в отдельные моменты времени достигала 27%. Предельные значения относительной погрешности измерений температуры с помощью термопары на различных глубинах в значительной степени зависят от уровня и скорости теплового нагружения.

- В области квазиустановившегося температурного поля относительные погрешности показаний термопар заметно снижаются – для ТЗМК-10 до уровня, не превышающего 4%.

Список литературы

1. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 392 с.
2. Никитин П.В. Тепловая защита. М.: Изд-во МАИ, 2006. 512 с.
3. Алифанов О.М., Черепанов В.В. Математическое моделирование высоко-копористых волокнистых материалов и определение их физических свойств. // ТВТ. 2009. Т.47. №3. С. 463-472.

Имеется перевод: Alifanov O.M., Cherepanov V.V. Mathematical simulation of High-Porosity Fibrous Materials and Determination of Their Physical Properties. // High Temperature. 2009 V.47. №3. P.438-447.

4. Алифанов О.М., Будник С.А., Михайлов В.В., Ненарокомов А.В. Экспериментально-вычислительный комплекс для исследования теплофизических свойств теплотехнических материалов // Тепловые процессы в технике. 2009. Т. 1. № 2. С. 49-60.
5. Алифанов О.М., Черепанов В.В. Идентификация моделей и прогноз физических свойств высокопористых теплозащитных материалов. // ИФЖ. 2010. Т.83. №4. С.720-732.

Имеется перевод: Alifanov O.M., Cherepanov V.V. Identification of models and prediction of physical properties of highly porous heat-shielding materials. // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2010. V.83. №4. P. 770-782.

6. Alifanov O.M., Inverse Heat Transfer Problems. Springer:Verlag, Berlin, 1994.
7. Alifanov O.M., Artyukhin E.A. and Romyantsev S.V., Extreme Methods for Solving ill-posed Problems with Applications to Inverse Problems. Begell House, New York, 1995.

8. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988. 279 с.
9. Алифанов О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 216 с.
10. Чистяков В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
11. Гордов, А.Н. Основы температурных измерений. М.: Энергоатомиздат, 1992 . 304 с.
12. Олейник Б.Н. Приборы и методы температурных измерений : учеб. пособие для сред. спец. учеб. заведений по спец. "Электротеплотехнические измерения". М.: Изд-во стандартов, 1987. 296 с.
13. Линеveg Ф. Измерение температур в технике: Справочник / Ф. Линеveg; под ред. Л. А. Чарихов; пер. Т. И. Киселева; пер. В. А. Федорович. М.: Металлургия, 1980. 543 с.
14. Геращенко О.А. Тепловые и температурные измерения: Справочное руководство / О.А. Геращенко, В.Г. Федоров. Киев: Наукова думка, 1965 . 304 с.
15. Данишевский С.К., Сведе-Швец Н.И. Высокотемпературные термопары. М.: Металлургия, 1977. 232с.
16. Резник С.В., Михалев А.М. Определение методической погрешности термопарных измерений в частично прозрачных рассеивающих материалах при нестационарном нагреве. Математическая модель. // Известие ВУЗов. М.: Машиностроение, 1988. №2. С.63-67.
17. Резник С.В., Михалев А.М. Определение методической погрешности термопарных измерений в частично прозрачных рассеивающих материалах при нестационарном нагреве. Проверка алгоритма и численное моделирование. // Известие ВУЗов. М.: Машиностроение, 1988. №4. С.55-59
18. Елисеев В.Н., Воротников В.И., Товстоног В.А. Оценка погрешности измерения поверхности температуры полупроводникового материала

контактными датчиками. // Известие ВУЗов. М.: Машиностроение. 1981. №11 С. 77–81.

19. Елисеев В.Н., Воротников В.И., Товстоног В.А. Исследование методической погрешности измерения температур в полупрозрачных материалах с низкой теплопроводностью. // Известие ВУЗов. М.: Машиностроение., 1982. - №1 С.156–160.

20. Юферев В.С. О влиянии излучения на показания термопары в полупрозрачных кристаллах, вытягиваемых из расплава. // Журнал технической физики. 1981. т.51. вып.1 С.190-192.

21. Геращенко О.А. Температурные измерения. Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1984. 494с.

22. Боровкова Т.В. Методика определения погрешности измерения температуры с помощью термопар в элементах конструкций из неметаллических функционально неразрушаемых материалов. Диссертация к.т.н. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. 178 с.

23. Каржавин В.А. Влияние термоэлектрической неоднородности на точность измерения температуры термопарами. Диссертация к.т.н. – Обнинск: Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского, 2010. 147 с.

24. Сирота А. М. О методах испытаний термоэлектродов термопар // Заводская лаборатория. 1960. Т. 26. № 1. С. 120-122.

25. Ефремова Р. П., Кускова Н. В., Левина Л. Н., Матизен Э. В. К измерению температуры медь-константановыми термопарами // Измерительная техника. 1963. № 3. С. 25-28.

26. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы, третье издание. М.: «Энергия», 1978. 704с.

27. Методы измерения температуры: Сборник статей / под ред. В. А. Соколова. М.: Изд-во иностр. лит., 1954. Ч. I, II. 400 с.

28. Бурштейн А. И. Физические основы расчета полупроводниковых термоэлектрических устройств. М.: Физматгиз, 1962. 136 с.
29. Термоэлектрические материалы и преобразователи. Сборник статей под ред. А.И. Карчевского, М.:Мир, 1964. 351с.
30. Гордов А.Н. (ред.) Методы измерения температур в промышленности. М.: Metallurgizdat, 1952. 434 с.
31. Кулаков М.В., Макаров Б.И. Измерение температуры поверхности твердых тел. М.: Энергия, 1979. 96 с.
32. Гордов, А. Н. Основы пирометрии. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Metallurgiya, 1971. 448 с.
33. Ярышев Н.А. Смирнова Т. В., Заровная Н. Н. Погрешность измерения стационарного теплового потока на поверхности тела // Инженерно-физический журнал. 1958. Т.57. №4. С. 667-674.
34. Сергеев О.А., Мень А.А. Теплофизические свойства полупрозрачных материалов М.: Издательство стандартов, 1977. 288 с.
35. Оцисик М. Сложный теплообмен. М.:Мир, 1976 616 с.
36. Висканта Р. Перенос тепла теплопроводностью и излучением в поглощающих и рассеивающих средах // Теплопередача. 1965. Т.87, №1. С. 171-180.
37. Елисеев В.Н., Соловов В.А. Погрешности измерения температур термопарами в полупрозрачных материалах. // Гелиотехника. 1983. №6 С 45- 49.
38. Товстоног В.А. Метод комбинаторной статистической идентификации оптических констант светорассеивающих материалов // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. № 392. 1982. С. 47–54.
39. Горский В.В., Товстоног В.А. О применении метода моментов к решению уравнения лучистого переноса // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. № 205. 1976. С. 70–78.

40. Авиационно-космические системы. сборник статей под ред. Г.Е.Лозино-Лозинского и А.Г.Братухина, М.: Изд-во МАИ, 1997. 416 с.
41. Семенов Ю.П., Лозино-Лозинский Г.Е., Лапыгин В.Л., Тимченко В.А. Многоразовый орбитальный корабль БУРАН. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.
42. Алифанов О.М., Черепанов В.В. Идентификация физических свойств высокопористых волокнистых материалов методом статистического моделирования. // Вестник МАИ. 2008. Т.15. №5. С.109-117.
43. Черепанов В.В. Математическое моделирование спектральных и теплофизических свойств пеностеклоуглерода. // Тепловые процессы в технике. 2011. Т.3. №9. С.386 – 399.
44. Щурик А.Г. Искусственные углеродные материалы. Пермь, 2009. 342 с.
45. Солнцев С. С.. Некоторые особенности покрытий для плиток многоразовой теплозащиты орбитальных космических кораблей. // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ», 2014, №2. <http://viam-works.ru>
46. Божков Н.А., Занцев В.К., Обруч С.Н. Расчетные и экспериментальные исследования теплопереноса в высокопористых композиционных материалах. // ИФЖ. 1990. Т.59. №4. С.554-563.
47. Суржиков С.Т. Тепловое излучение газов и плазмы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. 544 с.
48. Алифанов О.М., Герасимов Б.П., Елизарова Т.Г., Занцев В.К., Четверушкин Б.Н., Шильников Е.В. Математическое моделирование сложного теплообмена в дисперсных материалах. // ИФЖ. 1985. Т.49. №5. С.781-791.
49. Алифанов О.М., Будник С.А., Ненарокомов А.В., Черепанов В.В. Экспериментально-теоретическое исследование процессов теплообмена в высокопористых материалах. // Тепловые процессы в технике. 2011. Т.3. №2. С. 53-65.

50. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с
51. Домбровский Л.А., Колпаков А.В., Суржиков С.Т. О возможности использования транспортного приближения при расчете переноса направленного излучения в анизотропно рассеивающем эрозионном факеле. // ТВТ 1991. Т.29. №6. С.1171-1177
52. Dombrovskiy L.A. Quartz-fiber thermal insulation: Infrared radiative properties and calculation of radiative-conductive heat transfer. // ASME J.Heat Transfer, 1996, v.118, № 2, p.408-414.
53. Алифанов О.М., Черепанов В.В. Несингулярная модель взаимодействия излучения с представительными элементами высокопористых материалов. // «Математическое моделирование» РАН. 2012. Т.24. №3. С.33-47.
54. Алифанов О.М., Черепанов В.В. Метод функциональной оптимизации для численного решения уравнения переноса излучения. //ЖВМ и МФ. 2011. Т.51. №3. С.504-514.
55. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел М: Изд-во «Наука». 1964. 488 с.
56. Алифанов О.М., Бобошина С.Б. Зайцева А.В., Черепанов В.В. Моделирование переноса излучения в теплозащитных материалах с высоким спектральным альбедо рассеяния. // Тепловые процессы в технике. 2012. Т.4. №9. С. 418-424.
57. Поттер Д. Вычислительные методы в физике. М.: Мир, 1975. 392с.
58. Киллин Дж. (ред.) Управляемый термоядерный синтез. М.: Мир, 1980. 480 с.
59. Черепанов В.В. Плоский стеночный зонд в термодинамически неравновесной сплошной плазме.// Деп. ВИНТИ. 1984. №1089-84 Деп. 22 с.

60. Богомолов С.В., Звенков Д.С. Явный метод частиц, не сглаживающий газодинамические разрывы. // Математическое моделирование. 2006. Т.19. №3. С.74-86.
61. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М: Наука, 1977. 456 с.
62. Ковеня В.М., Яненко Н.Н. Метод расщепления в задачах газовой динамики. Новосибирск: Наука, 1981. 304 с.
63. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач и их приложения к обратным задачам теплообмена. М.: Наука. 1988.
64. Черепанов В.В. Методология исследования и прогнозирования свойств высокопористых материалов для тепловой защиты летательных аппаратов. Диссертация д.т.н. М.: МАИ, 2012.268 с.