

Государственный научный центр Открытое акционерное общество
«Обнинское научно–производственное предприятие «Технология»

На правах рукописи

Серда Геннадий Николаевич



ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕПЛООБМЕНА В КЕРАМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛАХ

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Резник Сергей Васильевич

Обнинск – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ	стр.
ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ КЕРАМИКИ	12
1.1. Разновидности конструкционной керамики	12
1.2. Теоретические основы для исследования теплофизических свойств керамики	15
1.3. Технические средства высокотемпературных теплофизических исследований конструкционных и теплозащитных материалов	23
ГЛАВА 2. ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КЕРАМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ	32
2.1. Оптимизация эксперимента по применяемым критериям	32
2.2. Исходные условия эксперимента	33
2.3. Математические модели теплофизического эксперимента	36
2.4. Применение математических моделей для минимизации методической погрешности эксперимента	53
Выводы к главе	81
ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СТЕНД ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	82
3.1. Предпосылки создания	82
3.2. Установка радиационного нагрева	87
3.3. Средства управления режимом испытаний и регистрации экспериментальных данных	90
3.4. Автоматизированное оборудование для определения ТФХ керамических материалов	92

3.5. Погрешность термопары системы управления нагревом	97
Выводы к главе	106
ГЛАВА 4. МЕТОДЫ, СРЕДСТВА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В КЕРАМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ	107
4.1. Методика определения теплопроводности керамических материалов	107
4.2. Результаты исследования теплопроводности керамик на основе диоксида и нитрида кремния	109
Выводы к главе	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	116
ЛИТЕРАТУРА	118

Введение

Актуальность темы. В современных изделиях различного назначения, в том числе ракетного и авиационного, широко применяют керамические материалы [1]. Применительно к антенным обтекателям керамические элементы обеспечивают оборудованию необходимые тепловую, прочностную защиту и работоспособность в требуемом радиодиапазоне. Увеличение скорости полета ракет в атмосфере приводит к возрастанию нагрузок на обтекатель, повышению температуры его поверхности до 1500-2000 К, интенсификации теплообмена в нём и снижению его теплозащитных и прочностных показателей. Для обеспечения безопасной эксплуатации бортового оборудования в этих условиях материаловеды вынуждены заниматься разработкой новых керамических материалов, а конструкторы - учитывать температурные зависимости характеристик конструкционных материалов в новом диапазоне эксплуатационных температур. Прогнозирование теплообмена в конструктивных элементах невозможно без знания их теплофизических характеристик (ТФХ). Вместе с тем, справочные данные по ТФХ керамических материалов известны, как правило, до 1100 К, а данные по ТФХ ряда перспективных материалов, например стеклокерамики и нитридной керамики, отсутствуют.

При разработке и поставках серийной продукции выполняется большой объём работ по контролю различных и в том числе теплофизических характеристик керамики. Стабильность ТФХ материалов может являться одним из существенных признаков соблюдения параметров технологического процесса. Поэтому процедуры определения ТФХ должны обладать достаточно высокой производительностью и точностью.

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

Традиционные методы определения этой характеристики и их математико-алгоритмическое обеспечение основаны на стационарных или регулярных режимах одномерного теплопереноса в единичном образце исследуемого материала, а экспериментальные установки имеют достаточно сложные конструкции особенно, когда это касается исследований при высоких температурах. Продолжительность испытаний образца достигает десятков часов. Повышенные требования к точности измерения высоких температур заставляют применять дорогие платиносодержащие термопары. При длительном воздействии высоких температур возможно изменение структуры керамики, например, изменение пористости или фазового состава, и, как следствие, изменение значений ее теплопроводности. Экспериментальные образцы затруднительно изготовить из припусков заготовок изделий. Возникает необходимость изготовления образцов-свидетелей, характеристики материала которых могут отличаться от характеристик материала изделия.

Всё выше перечисленное делает традиционные методы определения коэффициента теплопроводности керамики при высоких температурах излишне трудоемкими и недостаточно информативными.

В последнее время получили развитие методы определения ТФХ при нестационарном теплообмене экспериментального образца, основанные на решении нелинейных коэффициентных обратных задач теплопроводности (КОЗТ) [2]. Они имеют существенные преимущества по сравнению с традиционными методами, но освоение соответствующих вычислительных программ вызывает затруднения у практиков, занятых преимущественно экспериментальными исследованиями.

Эффективным инструментом в реализации преимуществ новых методов определения ТФХ материалов являются математические методы оптимизации эксперимента [2]. Моделирование техники тепловых испытаний образцов материалов пока недостаточно проработано в части выбора режимов испытаний, формы и размеров образцов, характеристик испытательного оборудования и планирования измерений, недостаточен уровень метрологического

обеспечения. Отдельные виды моделирования применяются разобщённо, а не как взаимосвязанные части единой методологии. Следствием этого является недостаточная надёжность полученных результатов и неоправданно большие материальные и временные затраты.

Анализ возможных путей достижения поставленной цели показал целесообразность постановки комплексного исследования, объединяющего методы математического и физического моделирования теплообменных процессов в экспериментальных образцах, в элементах испытательного оборудования и методы оценки погрешностей полученных результатов.

Формулировка цели и задач диссертационной работы

Целью настоящей диссертационной работы является определение коэффициентов теплопроводности керамических материалов на основе диоксида и нитрида кремния в области измерения температур 300 – 1673 К методом одностороннего нагрева образцов с темпом нагрева до 5 град/с и с погрешностью не превышающей 10%.

Указанная цель предполагает решение следующих задач:

1. Оптимизация эксперимента по определению теплопроводности керамических материалов в условиях одностороннего радиационного нагрева с применением критериев минимизации материальных, энергетических и временных затрат.

2. Разработка комплекса физических и математических моделей прогнозирования теплообмена в керамических конструкционных материалах для оценки и минимизации погрешностей эксперимента, выбора режимов нагрева, формы и размеров образцов, параметров экспериментальной оборудования.

3. Выбор формы и размеров экспериментальных образцов керамических материалов, удовлетворяющих условиям эксперимента.

4. Разработка автоматизированного стенда теплофизических исследований керамических материалов с установкой одностороннего радиационного

нагрева образцов до температуры 1673 К с темпом нагрева до 50 град/с.

5. Разработка методики и определение эффективных коэффициентов теплопроводности исследуемых материалов в области измерения температур 300 – 1673 К и темпом нагрева 5 град/с, оценка погрешностей их определения.

6. Сравнительный анализ полученных экспериментальных данных по ТФХ керамических материалов с результатами определения другими методами.

Объект исследования – коэффициент теплопроводности, характеристика теплообменного процесса в материале, определяемая в условиях одностороннего нагрева образца.

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

Связь с планами и программами НИР и ОКР. Исследования по теме диссертации проводились в рамках ряда научно-технических программ: Федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники гражданского назначения», Федеральной инвестиционной программы (приказ Росавиакосмоса № 246 от 29.10.2003 г.), тематических планов фундаментальных и прикладных исследований ОАО «ОНПП «Технология» (договор №61-2001, договор №27-2005).

Выбор и разработка метода достижения поставленной цели осуществлены автором с учетом научных достижений в области теплофизических исследований, проводимых в ВИАМ, ОИВТ РАН, ИТФ СО РАН им. С.С. Кутателадзе, МАИ (НИУ), МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГУ им. М.В. Ломоносова, МЭИ, Тамбовском ГТУ, ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, ИТМО им. А.В. Лыкова и других организациях.

Весомый вклад в разработку современных методов определения ТФХ материалов внесли Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Бек Дж., Вертоград-

ский В.А., Гусева Л.И., Дульнев Г.Н., Зиновьев В.Е., Зуев А.В., Кинжери Дж., Кирпичев М.В., Коздоба Л.А., Круковский П.Г., Литовский Е.Я., Мищенко С.В., Ненарокомов А.В., Пелецкий В.Э., Петров В.А., Платунов Е.С., Пономарев С.В., Просунцов П.В., Резник С.В., Сергеев О.А., Страхов В.Л., Танаева С.А., Шашков А.Г., Юдин В.М.

Научная новизна:

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

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

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

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

На защиту выносятся методика определения теплопроводности керамики на основе диоксида кремния и нитрида кремния на автоматизированном стенде теплофизических исследований с установкой радиационного нагрева и новые научные результаты.

Практическая значимость диссертационной работы:

1. Создан автоматизированный стенд высокопроизводительных теплофизических исследований керамических материалов с односторонним радиационным нагревом образцов в диапазоне изменения температур 300-1673 К и

темпов нагрева до 50 град/с, удовлетворяющий условиям экспериментов с сохранением паспортной (исходной) структуры и свойств исследуемых материалов.

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

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

4. Проведенные в данной работе исследования и разработанное на их основе оборудование методы и средства позволили повысить температуру определения коэффициента теплопроводности перспективных керамических материалов с 1100 до 1673 К и более чем на два порядка величины сократили время проведения эксперимента, в двадцать пять раз уменьшили расход электроэнергии, потребляемой в эксперименте.

Степень достоверности результатов исследований, проведенных на моделях и образцах керамических материалов, подтверждается:

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

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

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, состоит в формулировке цели, постановке задач, выборе направлений исследований, разработке методов моделирования и программного обеспече-

ния, анализе и обобщении полученных результатов. Все основные результаты и выводы по работе сформулированы лично автором.

Апробация основных результатов диссертации. Материалы диссертационной работы доложены автором на: 2-й Международной научной конференции «Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы», Москва, 2003 г.; 27-м Сибирском теплофизическом семинаре. – Москва-Новосибирск, 2004 г., 16-й научно-технической конференции стран СНГ по проблеме «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» г. Обнинск, 2004 г.; Международном научном симпозиуме «Передовые технические системы и технологии», мыс Фиолент, Севастополь, Автономная республика Крым, Украина, 2005 г.; Международном научном симпозиуме «Теплофизика и термодинамика ракетно-космических систем», Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005 г.; 3-й и 4-й Международной конференции «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий», п.п. Кацивели – Понизовка, Жуковка, Автономная республика Крым, Украина, 2004, 2006, 2010 г.г.; 3-й Международной научной конференции «Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы», Москва, 2007 г.; 3-ей Международной конференции «Аэрокосмические технологии» посвящённая 100-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея, Реутово-Москва, ОАО «ВПК» МПО Машиностроение», МГТУ им Н.Э.Баумана, 2014 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 научных работ в виде статей и тезисов докладов в научно-технических журналах, в том числе из списка ВАК, и сборниках, сделано 9 докладов на научных симпозиумах и конференциях в 2004-2014 г.г.

Объем и структура работы. Диссертация имеет общий объем 127 страниц и состоит из введения, 4-х глав и заключения, содержит 55 рисунков, 4 таблицы, а также библиографию из 85 наименований.

В первой главе дан обзор современного состояния материаловедческих и теплофизических исследований конструкционной керамики, сформулированы цель и задачи настоящей работы. Вторая глава посвящена математическому моделированию теплофизического эксперимента с образцами керамических материалов. В третьей рассмотрены вопросы создания автоматизированного теплофизического стенда. В четвертой главе описана разработанная методика, приведены результаты исследований теплопроводности конструкционных керамических материалов новым и традиционными методами.

Автор выражает глубокую благодарность зав. кафедрой «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана, профессору, д.т.н. Резнику С. В. за научное руководство и всестороннюю помощь, директору – главному конструктору НПК РПО ОАО «ОНПП «Технология», профессору, д.т.н. Русину М.Ю. за ценные советы и поддержку в работе над диссертацией. Диссертант также благодарит своих коллег из ОАО «ОНПП «Технология», оказавших практическую помощь в создании автоматизированного испытательного оборудования и содействие в проведении экспериментальных исследований.

1. Современное состояние теплофизических исследований конструкционной керамики

1.1. Разновидности конструкционных керамических материалов и их теплофизические свойства

В конструкциях различного назначения для атомной и авиационной отраслей производства нашли применение керамические материалы, удовлетворяющие ряду специфических требований: устойчивостью к тепловому удару, высокой радиопрозрачностью, высокой удельной прочностью. Такие материалы, как правило, имеют низкую теплопроводность и температуропроводность, достаточно высокую теплоемкость, высокую прочность во всем температурном диапазоне, высокую ударную вязкость работы разрушения, низкую плотность и сохраняют работоспособность при температурах наружной поверхности обтекателя выше 1300 К [1].

С целью возможного применения ведутся исследования со следующими керамическими материалами:

- нитридная керамика, представляющая собой соединения азота с металлами и неметаллами, получаемые различными технологическими процессами;
- оксидная керамика, являющаяся продуктом спекания тугоплавких оксидов различных химических элементов – алюминия, магния, бериллия, иттрия, циркония и многих других;
- оксидная керамика на основе диоксида кремния в виде ситаллов, стеклокерамики и кварцевой керамики, представляющих собой стеклокристаллические составы, получаемые по технологии горячего прессования или керамической технологии.

Одним из основных требований к высокотемпературным материалам является высокая огнеупорность, определяющим критерием которой при выборе материалов является температура их размягчения $T_{\text{разм}}$ (начало перехода в пластическое состояние). В соответствии с этим отмеченные выше матери-

алы располагаются в убывающий по $T_{\text{разм}}$ (К) ряд: BN (3100) > MgO (2900) > BeO (2620) > Al₂O₃ (2120) > SiO₂ (1680) > стеклокерамика (1640) > ситалл (1620).

Самым существенным фактором, ограничивающим применение неорганических огнеупорных материалов, является термостойкость, т.е. сопротивление воздействию термоудара и термоциклическим нагрузкам. Согласно экспериментальным данным распределение керамики по термостойкости имеет вид: BN > SiO₂ > стеклокерамика > BeO > ситалл > Al₂O₃ > MgO.

Предел прочности керамических материалов на изгиб зависит от температуры. Оксиды алюминия, бериллия, а также ситаллы имеют сравнительно высокие прочностные характеристики до температуры 1100 К, после чего происходит их резкое снижение. При температуре выше 1500 К удовлетворительную прочность имеют только нитриды бора и кремния.

Температурный коэффициент линейного расширения влияет не только на термостойкость, но и в значительной степени определяют напряженное состояние соединения обтекатель–шпангоут. По этому свойству материалы располагаются в возрастающий по величине ряд (β , 10^{-6} град⁻¹): SiO₂ (0,4 – 0,7) < BN (0,5 – 2,8) < стеклокерамика (0,8 – 1,5) < ситалл (1,5 – 5,7) < Al₂O₃ (7,8) < BeO (8,9) < MgO (13,4).

Последовательность рассматриваемых материалов по коэффициенту теплопроводности λ в интервале температур от 300 до 1200 К в порядке возрастания имеет вид: SiO₂ < стеклокерамика < ситалл < Al₂O₃ < MgO < BeO < BN. В этом ряду выделяется нитрид бора, коэффициент теплопроводности которого сравним с коэффициентами теплопроводности металлов.

В серийном производстве антенных обтекателей (АО) – изделий сложной формы и сравнительно крупных габаритных размеров – нашли применение лишь материалы на основе Al₂O₃ и SiO₂ [1-5]. Керамика на основе других материалов из числа упомянутых выше не нашла применения в производстве

АО вследствие ряда трудностей, связанных с решением проблем технологического характера.

Обтекатели из высокоглиноземистой керамики работают до температуры 700 К, из ситалла – до 1000 К, из кварцевой керамики и стеклокерамики – свыше 1300 К.

Основные характеристики ряда керамических материалов, нашедших применение в производстве этих конструкций, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Физико-механические характеристики керамических материалов АО

п / п	Характеристика	Кварцевая керамика, Россия	Стекло-керамика Россия	Ситалл, Украина	Ситалл, США
		НИАСИТ	ОТМ357	АС 418	Пирокерам
1	ρ , кг/м ³	1940	2500	2650	2800
2	Π , %	7-12	0	0	0
3	$\sigma_{изг}$, МПа	35-110	100-155	100-145	60-140
4	E , 10 ⁻⁴ МПа	2,7-5,5	6,9	9,5	12,3
5	β , 10 ⁻⁷ К ⁻¹	5,5	15-19	5,5-22,5	36
6	λ , Вт/(м·К)	0,5-1,5	1,6-2,	1,8-2,1	3,5
7	c_p , Дж/(кг·К)	630-1800	800-1500	1050-1670	750-1260

Температурные зависимости коэффициента теплопроводности этих материалов – параметра, прямо и косвенно характеризующего их специфические свойства приведены на рисунке 1.1.

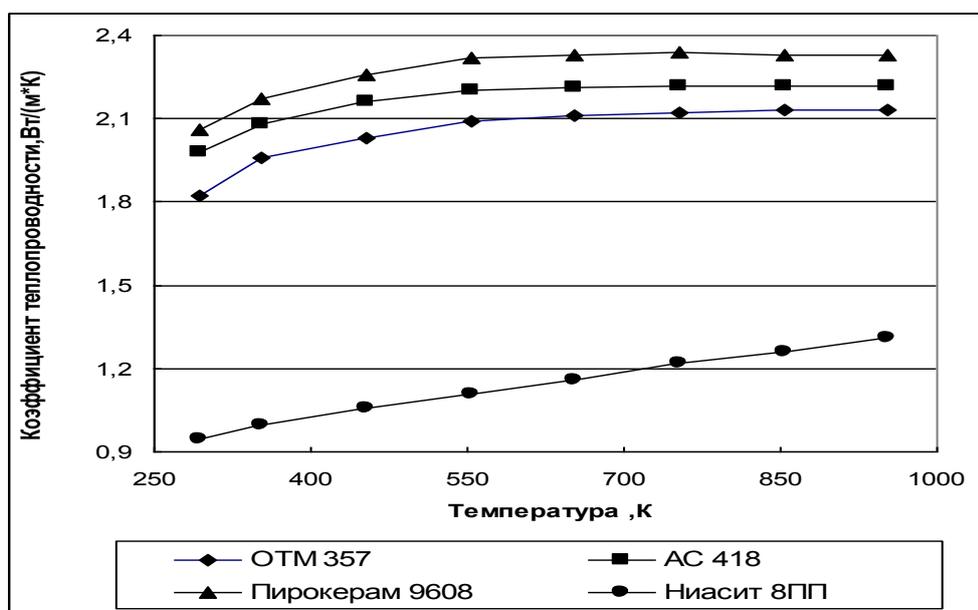


Рисунок 1.1– Температурные зависимости коэффициента теплопроводности

Кварцевую керамику по структурному строению характеризуют как пористый материал, имеющий воздушные поры в межзёрненном пространстве. Их доля в объеме достигает 10-12 % а распределение не имеет векторной ориентации. Стеклокерамика является беспористым материалом, содержащим стеклофазу в межзёрненном пространстве без векторной ориентации.

Керамика на основе диоксида кремния является семейством материалов, коэффициенты теплопроводности которого изменяются в зависимости от температуры в пределах 0,7 – 2,2 Вт/(м·К), а теплоёмкость от 600 до 1600 Дж/(кг·К). Её относят к группе керамических материалов с низкой теплопроводностью [6].

1.2. Теоретические основы исследования теплофизических свойств керамики

Библиография по методам и результатам исследования ТФХ конструкционной керамики, и в частности коэффициента теплопроводности, чрезвычайно обширна [7-41]. С математической точки зрения эти методы базируются на решениях коэффициентных обратных задач теплопроводности (КОЗТ). По принципу построения алгоритмов методы решения КОЗТ можно разде-

лить на прямые и экстремальные. Они определяют два магистральных направления исследований ТФХ.

В прямых методах искомые параметры теплопроводности находят непосредственно подстановкой значений экспериментального температурного поля (температуры и тепловые потоки) в найденное каким-либо образом решение базового уравнения в виде аналитической формулы или рекуррентного выражения [7,8].

В экстремальных методах производят оценку неизвестных параметров путем поиска экстремума (минимума) критерия, выражающего качественные характеристики измеряемых величин [13].

К методам первого направления, стационарным и нестационарным, в зависимости от характера протекающего в образце процесса теплопереноса и формы образца, относят методы пластины, цилиндра и шара. На практике их реализуют путем наибольшего приближения формы образца и режима нагрева к применяемой модели, которая описывает тепловой процесс постоянными или переменными полями температур внутри и потоков на границах образца. Этот подход упрощает обработку результатов измерений, но требует тщательной подготовки и проведения самого эксперимента. Стационарные методы оправдали себя при исследованиях ТФХ керамических материалов сравнительно высокой теплопроводности (более $6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$), так как меры обеспечения одномерности теплового потока, точность определения его величины, точность отнесения величины вычисленного коэффициента теплопроводности к средней температуре образца могут существенно влиять на достоверность результатов эксперимента. Значительно проще эти требования реализуют при использовании нестационарных или квазистационарных методов.

В практике теплофизических исследований керамики с низкими значениями коэффициента теплопроводности ($0,5 - 3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) получили распространение метод квазистационарного (постоянного) теплового режима (КТР), метод импульсного теплового потока (ИТП), метод лазерной вспышки. Они

реализованы на образцах в виде пластин (метод пластин), что с математической точки зрения делает процесс теплопереноса в образце одномерным. С точки зрения подготовки эксперимента такая форма образца уменьшает количество первичных преобразователей температуры и упрощает их монтаж по сравнению с цилиндрическими и шаровыми формами (методы цилиндров и шаров). Применение ленточных нагревателей сопротивления (нихром) позволяет по параметрам тока и напряжения в процессе эксперимента вычислять мощность и, следовательно, плотность теплового потока, падающего на фронтальную поверхность образца.

Результаты определения ТФХ материалов Ниасит 8ПП и ОТМ 357 этими методами приведены на рисунке 1.1.

При температурах более 1100 К выполнение условий моделирования для стационарных методов определения ТФХ материалов становится все более проблематичным [9] как с точки зрения возможностей испытательного оборудования и сложности учета методических погрешностей эксперимента, так и в связи с возможным изменением характера теплопереноса в образцах из-за особенностей их структурного строения и самой структуры исследуемых материалов вследствие значительной продолжительности эксперимента. Частичная прозрачность этих материалов усложняет процесс теплопереноса в них за счет излучения, и заставляет говорить об эффективном коэффициенте теплопроводности, содержащем в себе кондуктивную и радиационную составляющие. В огнеупорах с нулевой пористостью вклад радиационной составляющей заметно возрастает при температурах выше 1500 К [35]. Длительное воздействие при высоких температурах может перестроить структуру исследуемого керамического материала по вектору теплового потока.

В последние десятилетия получили развитие методы определения ТФХ неметаллических материалов и материалов с низкой теплопроводностью в динамических высокотемпературных и кратковременных по сравнению с традиционными режимах. Реализация их стала возможной в связи с успешными разработками алгоритмов решения математически некорректных нели-

нейных обратных задач теплообмена (ОЗТ) [13-24]. Имеется обширная литература [13-19], где подробно объясняются причины математической некорректности данного вида задач, приводятся сведения о методах решения, учёте предварительной информации и приемах тестирования алгоритмов.

По классификации ОЗТ определение ТФХ материалов относят к коэффициентным задачам [18]. Центральное место в теории некорректных ОЗ занимает принцип регуляризации [17], позволяющий получать устойчивые, но приближенные в рамках заданной точности решения при наличии случайных погрешностей в исходных данных.

Целый ряд регуляризирующих алгоритмов строится на основе экстремальной постановки ОЗ [14,19,21,22]. В этой постановке определение ТФХ может быть сведено к решению задачи безусловной многомерной оптимизации, представляющей итерационный процесс. Во многих работах [15-17] предпочтение отдают квадратичному функционалу, так как он положительно определен и имеет непрерывную первую производную. Наряду с этим встречаются и другие виды функционалов [35,36].

Принципиальное значение в методах итерационной регуляризации имеет выбор необходимого числа итераций. В [14] предложено вычислительный процесс решения ОЗТ останавливать по согласованию остаточной величины функционала и погрешности измерения температуры, однако не сообщается о способе определения этой погрешности. В [19] предложен метод останова вычислительного процесса на основе показаний дополнительного датчика температуры и построения вспомогательного функционала. Такой подход, отфильтровывая шумы в экспериментальных термограммах, не учитывает методическую погрешность измерения температуры.

Для минимизации функционала в ряде работ [15,29,36] описаны безградиентные методы, которые более просты в реализации, но уступают по скорости вычислений градиентным. К последним относят применяемые методы наискорейшего спуска, сопряжённых градиентов, переменной метрики [16,17]. Еще одним способом минимизации является прямое вычисление гра-

диента функционала при решении вспомогательной (сопряжённой) задачи [21,23], что значительно сокращает время его вычисления.

Методы определения ТФХ в условиях нестационарного теплового режима нагрева образцов строят чаще всего на основе решения одномерной нестационарной задачи ОЗТ в конечно-разностной постановке. Для обеспечения замкнутости краевых условий такой задачи необходимо проводить измерения тепловых потоков и температур в границах образца в процессе эксперимента.

Для реализации алгоритма решения КОЗТ необходимо минимально три первичных преобразователя, вид измеряемой величины которых зависит от граничных условий. Их варианты следующие: два датчика теплового потока и один датчик температуры для граничных условий 2-ого рода; один датчик теплового потока и два датчика температуры для смешанных граничных условий (1-ого и 2-ого рода); три датчика температуры для граничных условий 1-ого рода [36]. Применение датчиков теплового потока, работающих в области высоких температур (выше 1300 К), для измерения высокоинтенсивных падающих потоков (100-300 кВт/м²) проблематично из-за отсутствия таких конструкций в практике теплофизических исследований. Более привлекательным выглядит применение только датчиков температуры. Но в этом варианте возможно определение только одной теплофизической характеристики – коэффициента теплопроводности или удельной теплоёмкости при известной величине другой [24]. Применительно к керамике следует отметить, что удельная теплоёмкость является характеристикой, величина которой определяется в основном долевым составом удельных теплоёмкостей входящих в нее исходных элементов. Иллюстрацией этого положения являются расчетные и экспериментальные температурные зависимости удельных теплоёмкостей кварцевой керамики и стеклокерамики, приведенные на рисунке 1.2, которые показывают достаточно хорошее совпадение (6%) экспериментальных и расчётных значений теплоёмкости для обоих материалов.

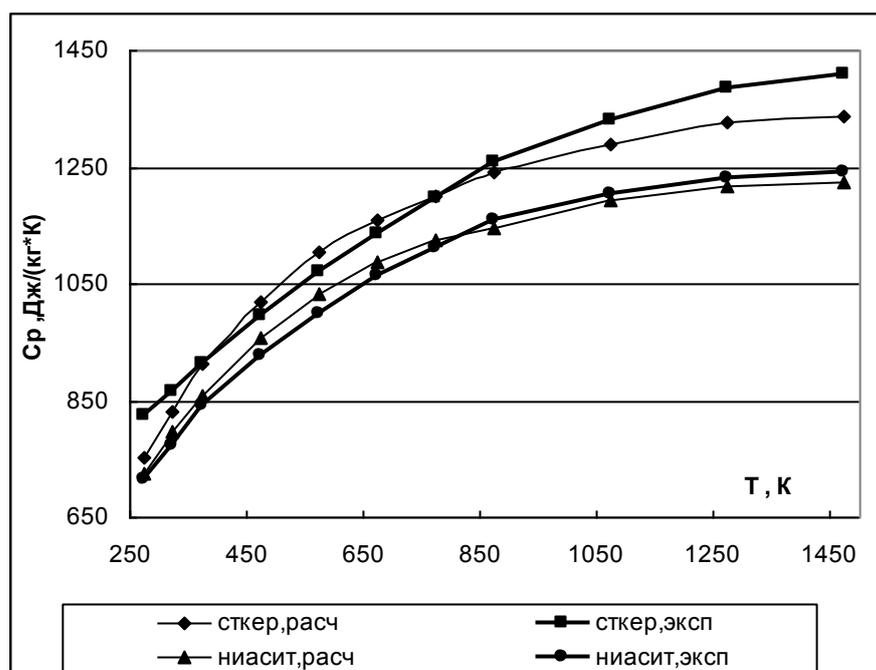


Рисунок 1.2. Температурные зависимости удельных теплоёмкостей материалов Ниасит-8ПП и ОТМ-357 от температуры

Коэффициент теплопроводности зависит от структуры самого материала и оказывается величиной, в большей степени по сравнению с теплоёмкостью зависящей от условий формирования конечного продукта.

Как было отмечено выше, метод определения какой-либо теплофизической характеристики и алгоритм решения соответствующей ОЗТ взаимосвязаны условиями нагрева образца, типом первичных преобразователей, их количеством и местом расположения в нем и рядом других условий.

Метод нестационарного теплового режима предназначен для определения температурных зависимостей коэффициента теплопроводности или объёмной теплоёмкости керамических материалов в диапазоне температур от 300 до 1500 К. В экспериментальной установке осуществляется односторонний лучистый нагрев фронтальной поверхности образца исследуемого материала по заданному температурному режиму и одновременное принудительное охлаждение его тыльной поверхности. В процессе эксперимента регистрируются значения температуры в нескольких точках по толщине пластины.

Для определения температурных зависимостей коэффициента теплопроводности или объёмной теплоемкости материала решается нестационарная нелинейная ОЗТ [2].

Математическая модель процесса нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и нелинейными граничными условиями имеет вид:

$$c(T)\rho \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x} \right); \quad (1.1)$$

$$T(x,0) = T_0(x); \quad (1.2)$$

для граничных условий 1-ого рода

$$T(0(\delta),\tau) = T_{w1(2)}(\tau). \quad (1.3)$$

где: c – удельная теплоёмкость материала; ρ – плотность материала; T – температура; x – пространственная координата; τ – время; λ – коэффициент теплопроводности; δ – толщина образца; индексы: $w1(2)$ – отнесение к фронтальной (тыльной) поверхности образца.

При решении ОЗТ используется экстремальная постановка обратной задачи, которая предполагает поиск зависимостей ТФС, приводящих к минимуму квадратичного функционала невязки экспериментальных и расчетных температур в местах установки датчиков за все время эксперимента:

$$S(\vec{u}) = \int_0^{\tau^e} \sum_{n=1}^{N_t} (T(x_n,\tau) - T^e(x_n,\tau))^2 d\tau; \quad \vec{u} = \{C(T), \lambda(T)\} \quad (1.4)$$

$$S(\vec{u}) = \min; \quad S(\vec{u}) \geq \int_0^{\tau^e} \sum_{n=1}^{N_t} \Delta_n^2 d\tau,$$

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

Расчетные значения температур в местах датчиков, используемые при вычислении функционала (1.4), определяют при помощи метода конечных разностей. Алгоритм вычисления $T(x,\tau)$ предусматривает итерационное уточ-

нение значений ТФС и граничных условий в пределах текущего временного шага. Условием перехода на следующий временной шаг является близость вычисляемых значений температуры, отвечающая заданной относительной точности ε_1 .

Решение ОЗТ ведется на основе метода итерационной регуляризации. Для построения итерационного процесса минимизации функционала невязки (1.4) используется градиентный метод.

Искомые температурные зависимости $c(T)$, $\lambda(T)$ представляют кусочно-линейными зависимостями [2]:

$$\lambda(\vartheta) = \sum_{k=1}^{\hat{e}_1} p_{1,k} \varphi_{1,k}, \quad (1.5)$$

где $p_{1,k}$ – искомый параметр; $\varphi_{1,k}$ – базисная функция; K_1 – заданное число параметров, аппроксимирующих $\lambda(T)$.

Градиенты функционала невязки по параметрам $p_{1,k}$ определяют из решения сопряженной задачи [2]. Останов итерационного процесса осуществляется при выполнении следующих условий:

а) достигнуто значение функционала: $S < S_{\min}$ (1.6)

б) удовлетворено условие близости двух последних приближений искомых зависимостей:

$$\left| \frac{\lambda^k - \lambda^{k-1}}{\lambda^k} \right| < \varepsilon_2; \quad (1.7)$$

$$\left| \frac{S^k - S^{k-1}}{S^k} \right| < \varepsilon_3, \quad (1.8)$$

где ε_2 – относительная требуемая точность определения искомых зависимостей; ε_3 – минимальное относительное изменение функционала, после которого считается нецелесообразным продолжение итерационного процесса.

в) превышено максимальное допустимое количество итераций процесса минимизации функционала.

По завершении итерационного процесса анализируется сходимость минимизационного процесса. Обычно, начиная с 4-го или 5-го приближения,

вид и величина восстанавливаемой зависимости слабо меняется, скорость сходимости при этом, как правило, падает. Дальнейшие вычисления приводят к получению резко отличных волнообразных форм искомым зависимостей, что сопровождается ростом скорости сходимости. Это говорит о необходимости прекращения вычислений. За результаты принимают коридор значений, образуемый восстанавливаемыми зависимостями на двух итерациях, непосредственно предшествующих началу «разболтки».

Данный алгоритм реализован в виде программы ICP-3 [24], написанной на ФОРТРАНе и работающей в среде Microsoft Windows 95 и более поздних версиях.

1.3. Технические средства высокотемпературных теплофизических исследований конструкционных и теплозащитных материалов

Под техническими средствами теплофизических исследований подразумевают:

оборудование для управления режимом испытаний, сбора и обработки информации от датчиков с целью определения значений исследуемых характеристик;

средства создания тепловых полей в исследуемом образце (нагревательная установка);

средства получения первичной информации о тепловом (температурном) состоянии объекта в процессе испытаний (первичные преобразователи температуры и/или теплового потока) или средства диагностики теплового состояния объекта.

Их подбор зависит от методов определения ТФХ исследуемых материалов, области предполагаемого изменения их свойств, области температурных исследований, уровня технической базы эксперимента.

Одним из магистральных направлений совершенствования исследований свойств материалов является автоматизация. В нашей стране положительные результаты автоматизации теплофизических измерений были до-

стигнуты еще в 1970-е годы [27]. Под руководством В.В. Власова в МИХМе, а позднее под руководством С.В. Мищенко в ТИХМе (ныне Тамбовский государственный технический университет) были развернуты работы по созданию автоматизированных средств исследования теплофизических свойств (ТФС) полимерных материалов. Обработка экспериментальных данных основывалась на использовании метода интегральных характеристик [28, 29]. При этом определялись коэффициенты теплопроводности, теплопроводности твердой и жидкой фазы, скрытой теплоты фазового перехода и координаты границы раздела фаз [30]. Метод был реализован для сравнительно невысоких температур, характерных для процессов переработки полимерных и материалов.

В ИТТФ НАН Украины под руководством Т.Г. Грищенко был создан прибор ИТ-3, который с начала 1980-х годов стал оснащаться аналоговым вычислителем для операций над сигналами термоэлектрических преобразователей, в том числе для определения коэффициента теплопроводности и средней температуры образца, а также для цифрового отображения результатов вычислений. К достоинствам прибора ИТ-3 можно отнести относительно небольшие габариты ($500 \times 400 \times 170$ мм³) и массу (менее 10 кг), малую потребляемую мощность 40 ВА. Однако с учетом большого времени прогрева (до 1 часа) полное время определения коэффициента теплопроводности составляло около 1,3 часа. Система имела невысокую производительность и довольно узкий диапазон температур.

Значительная работа по автоматизации теплофизических измерений проведена в Ленинградском технологическом институте холодильной промышленности. Е.С. Платуновым, С.Е. Буравым, В.В. Курепиным и их коллегами разработан унифицированный ряд приборов ИТ-400 (ИТ-λ-400, ИТ-а-400, ИТ-с-400, и др.) для измерений коэффициентов теплопроводности, теплопроводности и удельной теплоемкости при температурах от 220 до 700 К [11].

Освоение промышленностью серийного выпуска унифицированного ря-

да приборов ИТ-400 заложило фундамент для перехода к выпуску более совершенных автоматизированных приборов, таких как ИТА-с- λ -400, ИТСМ-1 [30]. В середине 1980-х годов в конструкторском бюро теплофизического приборостроения (ГСКБ ТФП г. Ленинград) Г.С. Петровым, В.И. Новицким, В.М. Бурковским был разработан комплекс АКТСМ для измерения теплопроводности, удельной теплоемкости, температуропроводности в монотонном режиме нагрева образца в интервале измерения температур 200 – 700 К. Для более полной автоматизации процессов измерения, обработки и регистрации результатов измерений в комплексе была применена микро-ЭВМ типа СМ-1800 и пропорционально-интегральные регуляторы, что позволило уменьшить относительную погрешность измерений за счет более точного регулирования и улучшения равномерности разогрева ячеек, а также автоматизировать как процесс измерений, так и вычисление значений ТФС. Программное обеспечение было разработано с использованием кросс-средств для микропроцессора К580ИК80 и операционной системы ДОС СМ1800. Обращает на себя внимание возможность регулирования дискретности шага температуры на уровне 1 градуса. Продолжительность эксперимента составляла около 1,5 часов.

Значительные успехи в разработке автоматизированных систем для теплофизических исследований были достигнуты в Институте высоких температур АН СССР (ИВТАН) В.Э. Пелецким и А.В. Кириллиным [31]. Так, под руководством В.Э. Пелецкого был автоматизирован процесс измерений коэффициента температуропроводности по методу лазерной вспышки. Метод лазерной вспышки (лазерного импульса) за последние десятилетия получил наибольшее распространение при измерении температуропроводности и теплопроводности различных твердых тел, порошков и жидкостей. В этом случае образец равномерно прогревают до заданной температуры, после чего фронтальная сторона образца, представляющего собой диск толщиной 1-3 мм и диаметром 5-10 мм, подвергается воздействию лазерного импульса длительностью менее 0,001 секунды. В процессе эксперимента бесконтактным

методом регистрируется изменение температуры на тыльной стороне образца. Вычисленное значение ТФС относят к достигнутому значению постоянной температуры. К достоинствам метода лазерной вспышки следует отнести небольшие размеры образца при достаточно высокой требовательности к качеству его изготовления по чистоте и параллельности поверхностей подвода и отвода лазерного импульса, малую продолжительность эксперимента и отсутствие датчиков температуры в объеме образца. К недостаткам - трудности в обеспечении равномерного прогрева образца на полках постоянных температур особенно в области высоких температур.

Среди зарубежных производителей подобных систем нельзя не отметить фирму NETZSCH [32]. Прибор LFA 457 MicroFlash[™] – ее последняя разработка в области метода лазерной вспышки. Этот настольный вариант позволяет проводить измерения температуропроводности в интервале температур от 150 до 1400 К. Измерение температуры на тыльной поверхности образца даже при 150 К стало возможным благодаря применению новой инновационной технологии инфракрасных сенсоров.

Со середины 1980-х годов практически все новые автоматизированные системы теплофизических исследований включают персональные ЭВМ в качестве средства подготовки, управления экспериментом и обработки экспериментальных данных. В этот период в Институте сверхтвердых материалов АН УССР, в Киеве была создана установка УУТА-3000 для проведения прямого и дифференциального термического анализа тугоплавких металлов, сплавов, огнеупоров, керметов, композиционных и синтетических материалов в твердом (порошкообразном) и жидком состоянии. В УУТА-3000 применены оригинальные измерительные ячейки, снабженные капсулами с реперными веществами для прямой калибровки установки в каждом эксперименте. Нагрев и охлаждение исследуемого, эталонного и реперного материала осуществлялись в монотонном режиме со скоростью от 0,17 до 8,0 К/с в электрической печи сопротивления в атмосфере инертного газа. Задание режимов эксперимента, регистрация результатов и документирование выпол-

нялись автоматически ПЭВМ Искра 226.6. По диапазону рабочих температур 300–3000 К установка превосходила любые зарубежные аналоги, однако при сравнительно небольшой потребляемой мощности (3 кВт) установка имела большие габариты (500x905x1435 мм³) и массу до 150 кг.

Следует отметить, что в большинстве своем автоматизацию процесса измерения проводили на основе применения традиционных методов определения ТФХ (стационарных или квазистационарных) и электроаналоговых устройств измерения при использовании печей с нагревателями электрического сопротивления в виде лент, проволок, трубчатого типа из нихрома, вольфрама и им подобных материалов.

За рубежом в настоящее время серийно выпускается целый ряд автоматизированных установок для исследования ТФХ. Большую известность получили разработки фирмы «Holometrix», США. Однако, несмотря на более чем 30-летний опыт работы в данной сфере, фирма пока не смогла освоить производство автоматизированных систем, одновременно сочетающих в себе широкий температурный диапазон измерений (особенно это касается высоких температур), малые габариты и умеренную мощность.

В последние годы возможности автоматизации эксперимента, в том числе теплофизических исследований на основе применения методов нестационарного теплового потока и алгоритмов решения соответствующих КОЗТ, заметно выросли. На базе микропроцессорных технологий организовано производство программируемых регуляторов теплового режима испытаний для нагревательных элементов разных типов и многоканальных информационно-измерительных систем (ИИС) нового поколения, объединённых через интерфейс с компьютерами. Современные ИИС обладают большим быстродействием и разнообразием функциональных способностей за счет модульной структуры комплектования измерительных трактов в зависимости от типа применяемых первичных преобразователей. Разрабатываются компьютерные программы, имеющие модульную структуру. Они позволяют производить настройку режимов работы ИИС, обеспечивать управление силовыми

элементами установки (например, нагревателями), выполнять процедуры градуировки, калибровки измерительных трактов ИИС и проверки измерительных цепей в системе «измерительный тракт – датчик», осуществлять измерение, сбор и хранение экспериментальных данных, формировать исходные файлы данных для программ расчета требуемых характеристик. Таким образом, компьютер, объединённый с ИИС, образует операторскую станцию проведения автоматизированного эксперимента.

В нашей стране разработкой и производством специализированных информационно-измерительных систем и программного обеспечения к ним успешно занимается НПП «Мера», г. Королев. На базе измерительных систем МИС-300М, МИС-400 построены стенды и мобильные регистраторы-анализаторы для испытаний и исследований различных параметров ракетно-космических конструкций и механизмов [33].

В теплофизических экспериментах применяют разнообразные способы и средства создания тепловых нагрузок. Их классификацию строят по основному механизму передачи тепла к объекту испытаний [7]. Это – нагревание контактное, конвективное, тепловым излучением, объёмное. Применительно к исследованию ТФС керамических материалов реализуют первые три способа.

Контактное нагревание реализовано в лабораторных установках при определении ТФХ материалов классическими методами при температурах до 1300 К [34].

Конвективное нагревание реализуется применительно к лабораторным исследованиям с помощью газовых горелок, плазмотронов. Так, например, даже при низком коэффициенте передачи тепловой энергии к объекту исследования этим способом максимальная температура определения коэффициента теплопроводности при испытании лабораторных образцов оксидной керамики достигала 2000 К [35–41]. Но при этом для оценки одномерности теплового поля вдоль продольной оси образца было использовано сравнительно большое количество термопар (12) и калориметров (5), что делает

подготовку к эксперименту достаточно трудоёмкой операцией, а обработку результатов не совсем оперативной по времени.

Нагревание тепловым излучением наиболее многообразно по виду источника тепла. Оно включает в себя электрические источники с твёрдым телом накала и плазменные, лазеры, концентраторы солнечного излучения и комбинированные солнечно-лазерные системы. Наиболее доступными источниками для создания стендов радиационного нагрева являются галогенные лампы накаливания (ГЛН) разных типов [2]. Многообразие вариантов их компоновки по количеству и геометрической структуре позволяют создавать из них блоки нагревателей для образцов различных размеров и форм. Они обеспечивают проведение испытаний в широкой области температур и темпов нагрева с прогнозируемой равномерностью падающего теплового потока. Исследование ТФС керамических материалов нестационарными методами нагрева в области температур до 1700 К может быть решено использованием источников типа ГЛН. Следует отметить, что тепловой расчет нагревательных установок обычно ведут на основе решения стационарных задач сопряженного теплообмена в одномерной постановке [42], хотя проекционный расчет элементов нагревательного оборудования в режимах его эксплуатации на основе тепловых моделей нестационарного теплопереноса уже нашел применение [43,44].

Для измерения температурного состояния внутри нагреваемого объекта применяют термопары [45-47]. Для кратковременных измерений до 1500 К основным типом первичного преобразователя остаётся хромель-алюмелевая термопара благодаря стабильности свойств, линейной характеристике термо-ЭДС, низкой стоимости и наличию многообразной вторичной аппаратуры. Известно, что при использовании термопар из-за различия ТФХ материалов образца и термопары происходит искажение температурного поля в месте установки датчика. Разность температуры, которую имел бы материал в точке установки термопары, и температуры, показанной термопарой в той же точке, называют методической погрешностью измерения температуры

(МПИТ). Для контроля и уменьшения МПИТ предложены расчетно-теоретические методы, описывающие теплообмен в системе «термопара-образец» [48-63]. В перечисленных работах образцы наделяли априори известными теплофизическими свойствами металлов, изоляторов, стекол. Наиболее сложными являлись методы определения МПИТ в частично прозрачных материалах. С позиций метрологического обеспечения эксперимента желательно располагать термопары в изотермических плоскостях, что существенно уменьшает отток тепла от горячего спая термопары. При измерении температуры внутри образца целесообразно применять термопары минимально возможного диаметра в зоне горячего спая, чтобы уменьшить размер полости для её размещения и сделать тепловое возмущение поля образца от неё более прогнозируемым, и располагать их друг от друга на расстоянии не менее 10 диаметров их электродов. Отечественная промышленность серийно выпускает термоэлектродную проволоку с минимальным диаметром 0,2 мм. С учётом выше изложенного при реализации метода нестационарного нагрева целесообразна предварительная оценка МПИТ датчиков решением многомерной прямой задачи теплообмена в той же системе краевых условий, корректировка экспериментальных данных, а затем решение одномерной ОЗТ.

В практике определения ТФХ материалов, близких к теплоизоляторам, методом нестационарного нагрева нашли применение образцы в виде пластин, цилиндров, дисков [7]. Конкретных рекомендаций по оптимальной форме и размерам образцов нет. Общие рекомендации сводятся к выбору такого образца, чтобы теплоперенос в нём наибольшим образом соответствовал краевым условиям постановки применяемой в эксперименте ОЗТ.

Ряд публикаций [29, 35, 64] посвящён вопросам оптимального планирования теплового эксперимента с целью получения лучших результатов решения соответствующей ОЗТ. В них рассматриваются методы планирования измерений температуры, определения рациональной продолжительности испытаний образцов и условий теплового воздействия. Достаточно убедительно аргументированные с математической точки зрения, они не всегда содер-

жат практические рекомендации по оптимизации конкретного теплофизического эксперимента. Вместе с тем, в рамках такого подхода выработана рекомендация о целесообразности установки трех термодатчиков в образце, два из которых используются для задания граничных условий, а третий промежуточный служит для построения функционала невязки расчетных и экспериментальных значений температуры [2].

2. Физическое и математическое моделирование теплообмена в керамических конструкционных материалах

2.1. Оптимизация эксперимента по применяемым критериям

Теплофизический эксперимент в широком понимании этого определения является мероприятием, включающим в себя решение вопросов организационного и технического характера. Организацию эксперимента с точки зрения условий его проведения относят к задачам планирования эксперимента [64-67]. Под организацией эксперимента понимают некую совокупность действий, направленных на достижение поставленной цели наилучшим способом. Разработан ряд подходов к её выполнению. Одним из них является организация эксперимента по выполняемым критериям. В теории операций это может быть система решений с иерархической структурой, зависящей от выбора критериев (приоритетов) на каждом шаге решения. Иерархия приоритетов в их последовательном выполнении позволяет решить поставленную задачу. В основу выполнения каждого приоритета можно поставить требование минимизации необходимых и достаточных условий для его достижения [67].

Для постановки задачи планирования теплофизического эксперимента и выбора приоритетов рассмотрим роль и место определения ТФХ материалов в общем процессе исследований. По классификации значимости такой эксперимент следует отнести к уровню лабораторных исследований [2]. Применительно к конструктивным керамическим элементам, это – испытания, выполняемые на образцах из припуска заготовки обтекателя или образцах-спутниках. Они могут носить массовый характер, если определяемые характеристики являются параметрами контроля технологического процесса изготовления изделий, и должны быть по возможности минимально затратными по стоимости и продолжительности их подготовки и проведения, а результаты – достоверными по критериям оценки.

На основании проведённого обзорного исследования состояния теплофизических экспериментов можно выстроить следующую структуру приоритетов для организации и проведения работ:

исходные условия – математические модели эксперимента – образец исследуемого материала – технические средства проведения эксперимента – методика определения искомой теплофизической характеристики материала.

2.2. Исходные условия теплофизического эксперимента

Исходные условия включают в себя требования, в рамках которых должна быть достигнута конечная цель эксперимента. Применительно к данной работе такими условиями являются:

температурная область исследования параметров: 300 -1673 К;

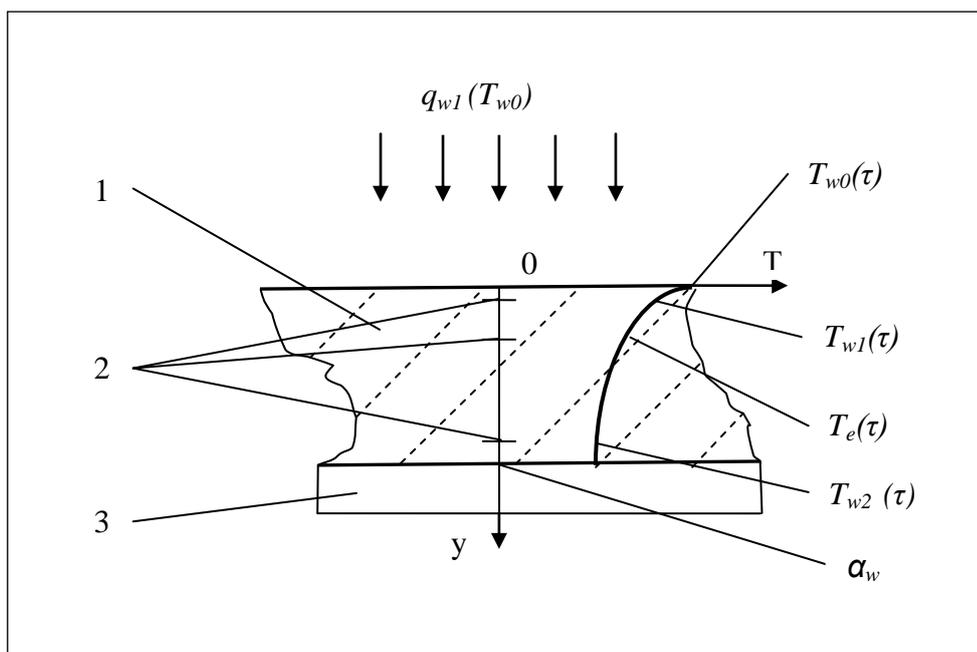
способ нагрева образца материала – нестационарный, односторонний, радиационный, сокращающий продолжительность испытаний до нескольких минут и исключая возможное изменение структуры исследуемого материала в процессе нагрева;

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

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

способ оценки результатов эксперимента – статистико-вероятностный.

Принципиальная схема теплофизического эксперимента представлена на рисунке 2.1.



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

Рисунок 2.1- Схема эксперимента по определению ТФХ керамических материалов

В основу эксперимента положен способ одностороннего нагрева образца материала по регулярному режиму 2-го рода $T_{w0}(\tau)$ и измерения в процессе испытаний температур в нескольких точках образца (не менее трёх), равно удалённых от поверхности нагрева. Контроль программы нагрева образца ведут по термопаре, закреплённой на его фронтальной поверхности $T_{w0}(\tau)$. Определение теплопроводности материала выполняется на основе решения одномерной нестационарной КОЗТ ИСР-3 [24]. Решение обратной задачи теплопроводности построено на условиях минимизации функционала невязки $S(u)$ экспериментальных $T^e(y_n, \tau)$ и расчётных $T(y_n, \tau)$ температур в местах установки датчиков y_n в течение всего эксперимента в экстремальной постановке:

$$\min S(\bar{u}) = \int_0^{\tau} \sum_{n=1}^{N_i} (T(y_n, \tau) - T^e(y_n, \tau))^2 d\tau < \delta_M^2; \quad \bar{u} = \{c(T), \lambda(T)\}; \quad (2.1)$$

$$\delta_M = \sqrt{(\delta_{M1}^2 + \delta_{M2}^2)}; \quad \varepsilon_{M1} = f(c(T), l_y, T_{w1}(\tau), \alpha_{w2}); \quad \delta_{M2} = f(T_{w1}(\tau), c_n(T), \lambda_n(T), \alpha_{w2}, \alpha_{w1}), \quad (2.2)$$

где δ_M – устанавливаемая абсолютная погрешность определения теплопро-

водности, обусловленная неточностью задания параметров, используемых в решении ОЗТ.

Расчётные значения температур получают из решения методом конечных разностей прямой одномерной нестационарной задачи теплопроводности.

В практике теплофизических исследований определение заданной характеристики проводят на единичном образце. Оценку результатов эксперимента делают по полученному значению искомой величины и методической составляющей погрешности, которая является абсолютным параметром и не в полной мере информативна. Такой подход оправдан для уникальных или единичных работ. При определении свойств серийной продукции или оценки процесса изготовления её целесообразны исследования заявленных характеристик на выборках различного объёма образцов и обработка результатов эксперимента по показателям статистико-вероятностного подхода [68]. Это – среднее выборочное значение коэффициента теплопроводности $\lambda_{срi}$ и относительная погрешность его определения $\varepsilon_{\lambda i}$ для каждой из ряда заданных температур T_i эксперимента. Указанные параметры определяют по следующим формулам:

$$\lambda_{срi} = \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_{ij}}{n}, \quad \varepsilon_{\lambda i} = t_{\alpha} \times \left(\frac{\sum_{j=1}^n (\lambda_{ij} - \lambda_{срi})^2}{n \times (n-1)} \right)^{0.5} / \lambda_{срi}, \quad (2.3)$$

где n – объём выборки; λ_{ij} – рассчитанное j -е значение λ из выборки, относящейся к T_i ; t_{α} – значение коэффициента Стьюдента для заданного объёма выборки и доверительной вероятности α .

При описании температурной зависимости коэффициента теплопроводности исследуемого материала полиномом вид расчётных формул следующий:

$$\lambda_{ср} = \int_{T_0}^{T_k} \lambda(T) dT / (T_k - T_0), \quad \varepsilon_{\lambda} = t_{\alpha} \times \left(\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\lambda_{ij} - \lambda_{ср})^2}{m \times n \times (m \times n - 1)} \right)^{0.5} / \lambda_{ср}, \quad (2.4)$$

где ε_{λ} – приведённая погрешность эксперимента; $\lambda_{ср}$ – средневзвешенное или среднеинтегральное значение коэффициента теплопроводности в диапазоне температур измерения; m – количество точек измерения λ ;

T_0, T_k – начальная и конечная температуры диапазона измерений.

Приведённую погрешность эксперимента ε_λ можно представить в виде методической ε_m и случайной $\varepsilon_{сл}$ составляющих, которые связаны между собой формулой вида:

$$\varepsilon_\lambda = (\varepsilon_m^2 + \varepsilon_{сл}^2)^{1/2} \quad (2.5)$$

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

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

2.3. Математические модели теплофизического эксперимента

Частью работы по реализации эксперимента является моделирование ситуаций, приводящих к достижению критериев по заявленным условиям оптимизации.

Это – математические модели теплообмена, построенные на решении нелинейных задач нестационарной теплопроводности. Их перечень и конечные цели в порядке применения приведены ниже.

Математическая модель одномерного теплообмена в неограниченной пластине [69,70] для оптимизации условий применения программы ICP-3 по следующим показателям:

- уровню тепловых потоков, необходимых для обеспечения эксперимента в области заданных толщин образца и априори известных его ТФХ;
- режиму нагрева образца;
- толщине и форме образца;
- величине методической составляющей погрешности измерения температур в образце первичными преобразователями (термопары).

Математическая модель трёхмерного сопряжённого радиационного (внешнего) и кондуктивного (внутреннего) теплообмена в системе «внешний источник тепла – конструктивные элементы» [71] для проектного расчёта нагревательной установки:

- выбора толщин и материала теплоизолирующих элементов;
- определения количества источников тепла и порядка сборки их в блоке нагревателей;
- способа формирования образца – пластины исследуемого материала в виде набора стержней прямоугольного сечения;
- определения размеров зоны размещения термопар в образце;
- оценки тепловых потоков, проходящих через зону измерения температур в системе прямоугольных координат;
- формирования переменных граничных условий в модели расчета погрешностей измерения.

Двухмерная модель нестационарного теплообмена в образце – пластине конечных размеров – для оценки погрешностей измерения его температурного состояния термопарами в процессе испытаний:

вариант кондуктивного внутреннего теплопереноса[72,73].

2.3.1. Математическая модель одномерного нестационарного теплообмена в неограниченной пластине

Математическая модель одномерного теплообмена в образце реализуется программой, алгоритм которой построен на численном решении нелинейного уравнения нестационарной теплопроводности для неограниченной пластины методом элементарных тепловых балансов прогонкой на основе разностной схемы Кранка-Никольсона и с учётом рекомендаций, изложенных в работе [74].

Решение этой задачи указанным выше методом и конечно-разностным методом с неявной схемой решения, используемой в программе ICP-3, показало совпадение результатов расчета, полученных обоими методами.

В одномерной постановке уравнение нелинейной теплопроводности имеет следующий вид:

$$C(T) \frac{\partial T(\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} (\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y}), \quad 0 \leq y \leq l_y, \quad \tau \geq 0, \quad (2.6)$$

Граничные условия:

$$y = 0, \quad T(\tau) = V_{зад} \times \tau + T_{нач},$$

$$y = l_y, \quad -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_t (T_{нт} - T_{среды}), \quad (2.7)$$

$$\text{Начальные условия: } \tau = 0, \quad T(y) = T_{из}, \quad (2.8)$$

где $V_{зад}$ – задаваемый темп нагрева фронтальной поверхности образца ($y=0$), град/с;

$T_{нач}$, $T_{среды}$, $T_{нт}$ – начальная температура образца, температура среды отвода тепла и температура тыльной поверхности образца соответственно, К;

α_t – задаваемое значение коэффициента теплоотдачи на тыльной поверхности ($y=l_y$) для $T_{среды} = 293$ К, Вт/(м²·град).

Следует отметить, что задание граничных условий на тыльной поверхности образца в виде α_t и $T_{среды}$ даёт возможность при проведении реального эксперимента рассчитать величину и временную зависимость α_t и уточнить методическую составляющую общей погрешности определяемой теплофизической характеристики.

Разработанная математическая модель при изменении её граничных условий (ГУ) позволяет имитировать различные реальные режимы нагрева образца и получать для каждого режима значения температур в заданных точках пространственной и временной сетки расчётной схемы. Ввод этих данных в программу ИСР-3 даёт возможность вычислить необходимый параметр ТФС материала в виде набора его значений для заданной последовательности температур, оценить точность определения этих величин сравнением с табличными данными и выбрать оптимальный по погрешности и граничным условиям режим испытаний.

Для оценки падающего на образец теплового потока необходимо перевести заданные на фронтальной поверхности ГУ первого рода в адекватные ГУ второго рода. Эту процедуру позволяют выполнить следующие формулы:

$$y = 0, \quad q_{\text{ногл}} = -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y}, \quad q_{\text{над}} = q_{\text{ногл}} + \varepsilon \times \sigma_0 \times (T_{\text{нф}}^4 - T_{\text{среды}}^4),$$

$$q_{\text{ногл}}^1 = q_{\text{над}} - \varepsilon \times \sigma_0 \times (T_{\text{нф}}^4 - T_{\text{среды}}^4), \quad (2.9)$$

где $q_{\text{ногл}}^1$, $T_{\text{нф}}^1$ – плотность теплового потока, поглощённого фронтальной поверхностью другого образца, и температура этой поверхности;

ε – степень черноты поверхности образца;

σ_0 – постоянная Стефана – Больцмана.

2.3.2. Математическая модель сопряжённого радиационно-кондуктивного теплообмена в замкнутой излучающей системе

При проектировании тепловых установок для испытаний в режимах нестационарного теплообмена в качестве источников используют лампы инфракрасного нагрева типа КГ разной длины и мощности [2,75]. Номинальная линейная электрическая мощность ламп около 9 кВт/м. Общая мощность лампы определяется только длиной нити нагревателя. Выпускают три типа-размера ламп по мощности. Однако в силу специфических требований по высокой плотности падающего потока и ограничений по габаритным размерам нагревателей возникает необходимость в тщательном расчёте теплового баланса установки с учётом ТФС элементов конструкции, включая и образец, и собственного излучения их фронтальных поверхностей, непосредственно находящихся в зоне действия нагревателей.

Учесть усложнившийся подход к расчёту установки может математическая модель процесса нагревания, построенная на решении трехмерной задачи сопряжённого радиационно-кондуктивного теплообмена (РКТ) в которой в качестве внешних источников тепла применяют линейные источники в виде ламп радиационного нагрева.

В основу её решения положены следующие допущения:

поверхности всех тел – серые, их степень черноты и поглощательные способности зависят только от свойств материалов, используемых в установке;

собственное и отраженное излучения тел, участвующих в теплообмене, подчиняются закону Ламберта, учитываются в расчётах;

тела, участвующие в теплообмене, непрозрачны;

среда, окружающая тела, прозрачна для излучения;

нагреватели рассматривают как линейные источники тепла конечной длины, определяемой типом лампы, без учета оптических свойств защитных колб из кварцевого стекла;

поглощательная и отражательная способности нагревателей и возможное их взаимное затенение не учитываются;

коэффициенты теплоотдачи тыльных поверхностей элементов, входящих в состав блока теплоизоляции образца задаются;

коэффициенты теплоотдачи тыльных поверхностей отражателей и боковых поверхностей блока теплоизоляции образца рассчитываются в процессе решения.

Решение задачи РКТ численным методом состоит из последовательных решений трёх подзадач на каждом временном шаге расчётной схемы. Это – задача теплопроводности в управляющем режиме нагрева элементарном объёме для вычисления необходимого теплового потока нагревателей, задача внешнего радиационного теплообмена в системе «нагревательный блок – поверхности рабочей зоны» для численного задания граничных условий на фронтальных поверхностях элементов и задача теплопроводности для описания теплообмена в элементах установки, включая и образец исследуемого материала.

Температурное поле в элементах установки определяют решением трёхмерного нелинейного уравнения нестационарной теплопроводности:

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z}), \quad (2.10)$$

$$0 \leq x \leq l_x, \quad 0 \leq y \leq l_y, \quad 0 \leq z \leq l_z, \quad \tau \geq 0, \quad (2.11)$$

$$\tau = 0, \quad T(x, y, z) = T_0(x, y, z), \quad (2.12)$$

$$y = 0, \quad q_{\bar{n}\bar{a}\bar{e}} = -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (2.13)$$

$$y = l_y, \quad \alpha_y (T - T_{\bar{n}\bar{d}\bar{a}\bar{u}\bar{u}}) = -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (2.14)$$

$$\alpha_x (T - T_{\bar{n}\bar{d}\bar{a}\bar{u}\bar{u}}) = -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2.15)$$

$$x = l_x / 2, \quad \frac{\partial T}{dx} = 0, \quad (2.16)$$

$$z = 0, \quad \alpha_z (T - T_{\bar{n}\bar{d}\bar{a}\bar{u}\bar{u}}) = -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (2.17)$$

$$z = l_z / 2, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad (2.18)$$

где $\alpha_x, \alpha_z, \alpha_y$ – коэффициенты теплоотдачи тыльных поверхностей элементов установки по осям x, z, y системы координат; $q_{nozл}$ – плотность теплового потока, поглощаемого фронтальными поверхностями элементов от источников тепла и взаимного радиационного теплообмена; $T_{среды}$ – температура окружающей среды со стороны тыльных поверхностей элементов. В расчётах принимали $T_{среды} = 293$ К.

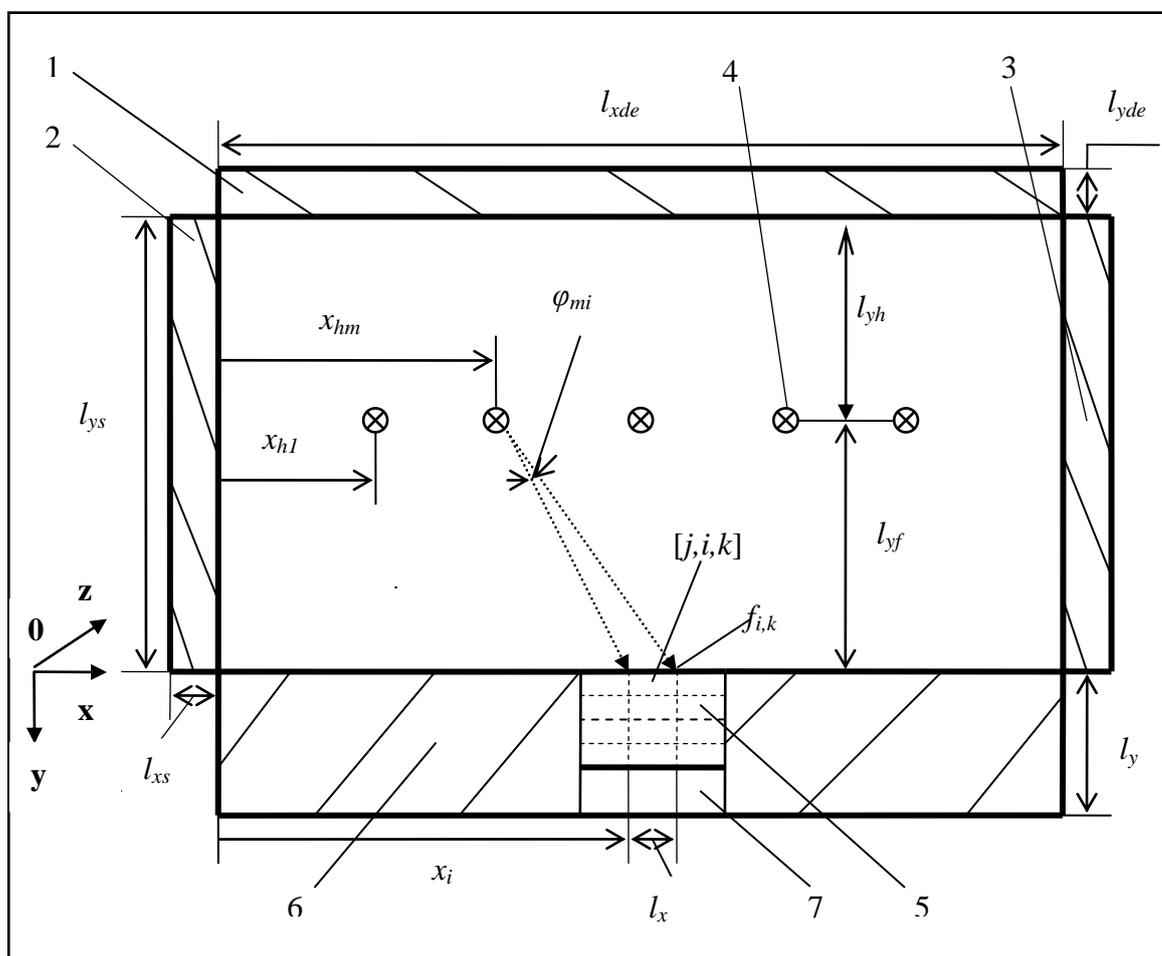
Уравнение внешнего радиационного теплообмена между источниками излучения и фронтальными поверхностями элементов горячей зоны установки имеет следующий вид:

$$q_{nozл}(i, k) = A(i, k) \left(\sum_{m=1}^n Q(m) \varphi(m)_{ik} \right) / f(i, k) + \sum_{s=1}^5 \varepsilon_{iks} \sigma_0 (t(s)^4 - t(i, k)^4) \psi_{iks} + A(i, k) \left\{ \sum_{s=1}^5 \psi_{iks} \left(\sum_{m=1}^n Q(m) \varphi(m)_s \right) / f_s \right\}, \quad (2.19)$$

где $q_{nozл}(i, k)$ – плотность радиационного теплового потока, поглощённого фронтальной поверхностью элемента (i, k) ; $A(i, k)$ – поглощательная способность фронтальной поверхности элемента (i, k) образца и теплозащитного слоя; $Q(m)$ – мощность излучения нагревателя (m) ; $\varphi(m)_{ik}, \varphi(m)_s$ – углы облу-

чения поверхностей элемента (i,k) и отражателя горячей зоны (s) нагревателем $Q(m)$ соответственно; $f(i,k)$ – площадь фронтальной поверхности элемента (i,k) ; ε_{iks} – приведённая степень черноты поверхностей теплообмена элемента (i,k) и отражателя (s) ; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана; $t(s)$, $t(i,k)$ – текущие значения температур фронтальных поверхностей отражателя (s) и элемента (i,k) соответственно; ψ_{iks} – угловой коэффициент взаимного излучения между поверхностями (i,k) и (s) ; s – номер отражателя горячей зоны установки; m – номер источника излучения блока нагревателей.

Схема поперечного сечения установки приведена на рисунке 2.2.



1–3 отражатели; 4 – нагреватели; 5 – образец исследуемого материала;
 6 – блок теплоизоляции образца; 7 – холодильник;
 $f_{i,k}$ – площадь поперечного сечения по оси 0 -у элемента $[i, k]$ фронтальной части установки;

$[j, i, k]$ – номер элемента фронтальной части установки в СК $O-y-x-z$;
 j – номер ряда элементарных объёмов в направлении оси $O-y$;
 i – номер ряда элементарных объёмов в направлении оси $O-x$;
 k – номер ряда элементарных объёмов в направлении оси $O-z$, соответственно, при определении температурных полей в конечно-разностной задаче теплообмена

Рисунок 2.2 – Оптико-геометрическая модель установки радиационного нагрева (сечение в плоскости $x-y$)

Задача (1) – (9) решается методом элементарных тепловых балансов [74]. Суть метода в составлении системы алгебраических уравнений, описывающих тепловой баланс каждого элементарного объёма сеточной области модели. Решение получают методом прогонки. Применение схемы Кранка-Никольсона, имеющей более высокий порядок сходимости по времени по сравнению с неявной четырёх точечной схемой, повышает точность расчёта.

Расчётная схема построена на применении трёхмерной пространственной сетки для образца, теплоизолирующей его боковые поверхности обечайки и холодильника, равношаговой в плоскости $x-z$ с минимальным размером ячейки 1,75 мм и разношаговой в плоскостях системы координат параллельных оси $O-y$ с минимальным размером шага ячейки в 0,02 мм вдоль этого направления. Для боковых и верхнего отражателей рабочей зоны модели установки применены одномерные сетки в направлении теплоотвода от фронтальных к тыльным поверхностям этих элементов. Их площади поперечных сечений в направлении теплопереноса равны размерам фронтальных поверхностей этих элементов, а боковые поверхности считаются теплоизолированными.

Применение шеститочечной схемы Кранка-Никольсона приводит к следующему выражению теплового баланса в элементарном тепловом объёме $[j, i, k]$ по одному из направлений системы координат ($O-y$) для временного шага $w+1$ расчётной схемы и условного равенства ТФС свойств материала этого шага и предыдущего шага w :

$$f_0 \times (T_2(j, i, k) - T_1(j, i, k)) = T_{y2}(j, i, k) - 2 \times T_2(j, i, k) + T_{y2}(j+1, i, k) + T_{y1}(j, i, k) - 2 \times T_1(j, i, k) + T_{y1}(j+1, i, k), \quad (2.20)$$

где $f_0 = l_y^2(j, i, k)/(a(j, i, k) \times d\tau)$, для направления расчета вдоль координаты y ;
 $T_{1y}(j, i, k)$, $T_{y1}(j+1, i, k)$, $T_{y2}(j, i, k)$, $T_{y2}(j+1, i, k)$ – температуры на левой и правой границах элементарного объёма для временных шагов w и $w+1$, соответственно;
 $T_1(j, i, k)$, $T_2(j, i, k)$ – температуры элементарного объёма для шагов w и $w+1$.

При расчете теплового потока ламп по заданной температуре управляющего элементарного объёма $[l, i_{ynp}, k_{ynp}]$ вспомогательные коэффициенты f_1, f_0, f_3, f_4 и прогоночные коэффициенты $rb_1(j), rb_2(j)$ имеют следующий вид.

Для фронтального граничного элементарного объёма:

$$f_1 = 1/(1 + h_y(2, i, k)/h_y(1, i, k)), \quad (2.21)$$

$$f_0 = l_y(2, i, k)^2/a(2, i, k)/d\tau, \quad (2.22)$$

$$f_3 = 1/(1 + h_y(2, i, k)/h_y(3, i, k)), \quad (2.23)$$

$$f_2 = f_0 + f_1 + f_3, \quad (2.24)$$

$$f_4 = f_1 * T_1(1, i, k) + (f_0 - f_1 - f_3) * T_1(2, i, k) + f_3 * T_1(3, i, k), \quad (2.25)$$

$$rb_1(3) = f_3/f_2, \quad (2.26)$$

$$rb_2(3) = (f_1 * T_2(1, i, k) + f_4)/f_2, \quad (2.27)$$

где $f_y(i, k)$ – площадь поперечного сечения элемента в направлении $0 - y$;
 $l_y(j, i, k)$ – размер элемента в направлении $0 - y$; $h_y(j, i, k) = h(j, i, k) * f_y(i, k)/l_y(j, i, k)$ – приведённый коэффициент теплопроводности элемента расчётной схемы в направлении $0 - y$.

Для внутренних элементов этого столбца $[i, j, k]$, где $1 < j < n_{yk} - 1$:

$$f_1 = 1/(1 + h_y(j, i, k)/h_y(j-1, i, k)), \quad (2.28)$$

$$f_0 = l_y(j, i, k)^2/a(j, i, k)/d\tau, \quad (2.28)$$

$$f_3 = 1/(1 + h_y(j, i, k)/h_y(j+1, i, k)), \quad (2.30)$$

$$f_2 = f_0 + f_1 + f_3, \quad (2.31)$$

$$f_4 = f_1 * T_1(j-1, i, k) + (f_0 - f_1 - f_3) * T_1(j, i, k) + f_3 * T_1(j+1, i, k), \quad (2.32)$$

$$rb_1(j+1) = f_3/(f_2 - rb_1(j) * f_1), \quad (2.33)$$

$$rb_2(j+1) = (f_1 * rb_2(j) + f_4)/(f_2 - rb_1(j) * f_1), \quad (2.34)$$

Для тыльного граничного элементарного объёма $[j, i, k]$, где $j = n_{yk} - 1$:

$$f_1=1/(1+ h_y(j,i,k) / h_y(j-1,i,k)), \quad (2.35)$$

$$f_0=l_y(j,i,k)^2/a(j,i,k)/d\tau, \quad (2.36)$$

$$f_3=1/(1+ 2*h_y(j,i,k)/hsx(i,k)/f_y(i,k)), \quad (2.37)$$

где $hsx(i,k)$ – коэффициент теплоотдачи с тыльной поверхности.

$$f_2=f_0+f_1+f_3, \quad (2.38)$$

$$f_4=f_1*T_1(j-1,i,k)+(f_0 - f_1 - f_3)*T_1(j,i,k)+f_3*T_{среды} \quad (2.39)$$

Откуда

$$T_2(j,i,k)=(f_3*T_{среды}+f_1*rb_2(j)+f_4)/(f_2-rb_1(j)*f_1), \quad (2.40)$$

Для остальных объёмов столбца n прогонкой от $j=nuk-2$ до $j=2$ проводим вычисления температур в элементах по формуле:

$$T_2(j,i,k)=rb_1(j+1)*T_2(j+1,i,k)+rb_2(j+1), \quad (2.41)$$

Для определения температуры фронтальной поверхности управляющего элемента $T_{y2}(i_{ynp}, k_{ynp})$ используем формулы:

$$f_1=1, \quad (2.42)$$

$$f_0=l_y(1,i,k)^2/a(1,i,k)/d\tau, \quad (2.43)$$

$$f_3=1(1+h_y(1,i,k)/h_y(2,i,k)), \quad (2.44)$$

$$f_2=f_0+f_1+f_3, \quad (2.45)$$

$$f_4=f_1*T_{y1}(i,k)+(f_0 - f_1 - f_3)*T_1(1,i,k)+f_3*T_1(2,i,k), \quad (2.46)$$

$$T_{y2}(i,k)=(f_2*T_2(1,i,k) - f_3*T_2(2,i,k)-f_4)/f_1, \quad (2.47)$$

Тогда тепловой поток, поглощённый фронтальной поверхностью управляющего режимом нагрева элемента, равен:

$$q_2^{\tilde{m}\tilde{a}\tilde{e}}(i_{\tilde{o}\tilde{d}}, k_{\tilde{o}\tilde{d}}) = 2h_y(i_{\tilde{o}\tilde{d}}, k_{\tilde{o}\tilde{d}}) \times (T_{y2}(i_{\tilde{o}\tilde{d}}, k_{\tilde{o}\tilde{d}}) - T_2(i_{\tilde{o}\tilde{d}}, k_{\tilde{o}\tilde{d}})), \quad (2.48)$$

Теперь, используя решения задачи внешнего теплообмена, запишем тепловой поток, поглощаемый поверхностью управляющего элемента рабочей зоны через мощность нагревателей, температуры поверхностей элементов рабочей зоны и их поглощательные способности. Если считать, что все нагреватели установки имеют одинаковые мощностные характеристики, то получим формулу для определения мощности одного нагревателя $q_2(m)$ на шаге $w+1$.

$$q_2(m) = \frac{q_2^{\tilde{m}\tilde{a}\tilde{e}}(i_{\tilde{o}\tilde{d}}, k_{\tilde{o}\tilde{d}}) - q_2^{2\tilde{m}\tilde{a}\tilde{e}}(i_{\tilde{o}\tilde{d}}, k_{\tilde{o}\tilde{d}})}{A(i_{\tilde{o}\tilde{d}}, k_{\tilde{o}\tilde{d}}) \times \psi_{ik}}, \quad (2.49)$$

где $q_2^{2\text{ногл}}(i_{\text{ynp}}, k_{\text{ynp}})$ – составляющая поглощаемого теплового потока управляющим элементом от радиационного теплообмена его с поверхностями других элементов рабочей зоны; $A(i_{\text{ynp}}, k_{\text{ynp}})$ – коэффициент поглощения поверхности; ψ_{ik} – обобщённый угловой коэффициент облучения фронтальной поверхности элементарного объёма $[l, i, k]$ всеми нагревателями установки.

Его рассчитывают по формуле:

$$\psi_{ik} = \sum_{k=1}^{nh} [\varphi_{ki} + \varphi_{ks1} \times (1 - A_s) \times \varphi_{s1i} + \varphi_{ks2} \times (1 - A_s) \times \varphi_{s2i} + \varphi_{kd} \times (1 - A_d) \times \varphi_{di}], \quad (2.50)$$

Затем, используя полученное значение мощности нагревателя $q_2(m)$, определяем тепловые потоки, поглощаемые фронтальными поверхностями элементов рабочего объёма установки, включая рефлектор и боковые отражатели, $q_2^{\text{ногл}}(i, k)$, $q_{2\text{def}}^{\text{ногл}}$, $q_{2s1}^{\text{ногл}}$, $q_{2s2}^{\text{ногл}}$. Далее, применяя метод правой прогонки и известную температуру окружающей среды $T_{\text{среды}}$, вычисляем прогоночные коэффициенты и одним из итерационных методов, например методом половинного деления, рассчитываем температуры фронтальных поверхностей $T_{y2}(i, k)$, и на шаге обратной прогонки – температуры в столбцах $T_2(j, i, k)$, расположенных под каждым фронтальным элементарным объёмом в направлении 0–у и коэффициенты теплоотдачи тыльных поверхностей отражателей α_b . Формулы, применяемые в методе правой прогонки, аналогичны приведенным выше формулам левой прогонки. Дальнейший расчет по другому направлению координатной сетки в образцах материала и тепловой защите холодильника, где задача теплообмена является трёхмерной, проводится методом правой прогонки при известных граничных температурах $T_{\text{среды}}$. На этом расчет для временного шага $w+1$ завершают, проводят переприсвоение индексов переменных, и цикл вычислений повторяется для следующего временного шага.

После выполнения приведенных выше операций определяем температуры на тыльных поверхностях (защитные кожухи) отражателей T_2^b по формуле:

$$T_2^b = \frac{T_2(i_b) \times 2 \times \lambda(i_b) + T_{\text{зад}} \times \alpha_b \times \delta(i_b)}{2 \times \lambda(i_b) + \alpha_b \times \delta(i_b)}, \quad (2.51)$$

где $T_2(i_b)$ – температура тыльной ячейки; $\lambda(i_b)$ – коэффициент теплопроводности тыльной ячейки; α_b – коэффициент теплоотдачи тыльной поверхности; $\delta(i_b)$ – размер тыльной ячейки расчетной схемы.

После сравнения полученных температур с заданными температурами цикл расчета повторяют, увеличивая или уменьшая толщины этих элементов l_{xss} , l_{ydef} до тех пор, пока температуры в этих элементах не попадут в область достаточных значений.

Для решения задачи внешнего теплообмена и задания граничных условий на его поверхностях применен резольвентный зональный метод [44]. Для решения этой задачи необходимо знание оптических характеристик теплообмена, в частности зональных угловых коэффициентов излучения. Формулы их вычисления приведены ниже.

$$\varphi_{mi,k} = (\arctg \frac{x_{i+1,k} - x_{hm}}{l_{yfh}} - \arctg \frac{x_{i,k} - x_{hm}}{l_{yfh}}) / (2\pi), \quad (2.52)$$

где $\varphi_{m,ki}$ – угловой коэффициент излучения на зону (i,k) от лампы m непосредственно;

$x_{i,k}$, $x_{i+1,k}$ – координаты начала и конца зоны (i,k) по оси X.

$$\varphi_{ms1} = (\arctg \frac{l_{yfh}}{x_{hm}} + \arctg \frac{l_{yhd}}{x_{hm}}) / (2\pi), \quad (2.53)$$

где φ_{ms1} – угловой коэффициент излучения на левый боковой отражатель $s1$ от лампы m ;

$$\varphi_{ms2} = (\arctg \frac{l_{yfh}}{l_{xdef} - x_{hm}} + \arctg \frac{l_{yhd}}{l_{xdef} - x_{hm}}) / (2\pi), \quad (2.54)$$

где φ_{ms2} – угловой коэффициент излучения на правый боковой отражатель $s2$ от лампы m ;

$$\varphi_{md} = (\arctg \frac{x_{hm}}{l_{yhd}} + \arctg \frac{l_{xdef} - x_{hm}}{l_{yhd}}) / (2\pi), \quad (2.55)$$

где φ_{md} – угловой коэффициент излучения на рефлектор d от лампы m ;

$$\varphi_{ds} = ((x_{i+1}^2 + L_{yss}^2)^{0,5} + ((L_{xdef} - x_i)^2 + L_{yss}^2)^{0,5})$$

$$(x_i^2 + L_{y_{ss}}^2)^{0,5} - ((L_{x_{def}} - x_{i+1})^2 + L_{y_{ss}}^2)^{0,5} / (2 * L_{x_{def}}), \quad (2.56)$$

где φ_{ds} – угловой коэффициент излучения на правый (левый) боковой отражатель s от рефлектора d ;

$$\varphi_{s1i,k} = (x_{i+1,k} - x_{i,k} + (x_{i,k}^2 + L_{y_{ss}}^2)^{0,5} - (x_{i+1,k}^2 + L_{y_{ss}}^2)^{0,5}) / (2 * L_{y_{ss}}), \quad (2.57)$$

где $\varphi_{s1i,k}$ – угловой коэффициент излучения на зону (i,k) от левого бокового отражателя $s1$;

$$\varphi_{s2i,k} = (x_{i+1,k} - x_{i,k} + ((L_{x_{def}} - x_{i+1,k})^2 + L_{y_{ss}}^2)^{0,5} - ((L_{x_{def}} - x_{i,k})^2 + L_{y_{ss}}^2)^{0,5}) / (2 * L_{y_{ss}}), \quad (2.58)$$

где $\varphi_{s2i,k}$ – угловой коэффициент излучения на зону (i,k) от правого бокового отражателя $s2$;

$$\varphi_{di,k} = [(x_{i+1,k}^2 + L_{y_{ss}}^2)^{0,5} + ((L_{x_{def}} - x_{i,k})^2 + L_{y_{ss}}^2)^{0,5} - (x_{i,k}^2 + L_{y_{ss}}^2)^{0,5} - ((L_{x_{def}} - x_{i+1,k})^2 + L_{y_{ss}}^2)^{0,5}] / (2 * L_{x_{def}}), \quad (2.59)$$

где $\varphi_{di,k}$ – угловой коэффициент излучения на зону (i,k) от рефлектора d ;

$$\varphi_{ds} = (L_{x_{def}} + L_{y_{ss}} - (L_{x_{def}}^2 + L_{y_{ss}}^2)^{0,5}) / (2 * L_{x_{def}}), \quad (2.60)$$

где φ_{ds} – угловой коэффициент излучения на боковой отражатель s от рефлектора d ;

$$\varphi_{ss} = ((L_{y_{ss}}^2 + L_{x_{def}}^2)^{0,5} - L_{x_{def}}) / L_{y_{ss}}. \quad (2.61)$$

где φ_{ss} – угловой коэффициент излучения между боковыми отражателями $s1$ и $s2$;

$$\varphi_{mdi,k} = \varphi_{md} * (1 - A_d) * \varphi_{di,k}, \quad (2.62)$$

где $\varphi_{mdi,k}$ – угловой коэффициент излучения на зону (i,k) от лампы m через отражение от поверхности рефлектора d ;

$$\varphi_{ms1i,k} = \varphi_{ms1} * (1 - A_s) * \varphi_{s1i,k}, \quad (2.63)$$

где $\varphi_{ms1i,k}$ – угловой коэффициент излучения на зону (i,k) от лампы m через отражение от поверхности левого бокового отражателя $s1$;

$$\varphi_{ms2i,k} = \varphi_{ms2} * (1 - A_s) * \varphi_{s2i,k}, \quad (2.64)$$

где $\varphi_{ms2i,k}$ – угловой коэффициент излучения на зону (i,k) от лампы m через отражение от поверхности правого бокового отражателя $s2$.

При заданной величине испускаемого линейным источником (нагревателем) потока $q_2(m)$ и известных температурах на фронтальных поверхностях

элементов установки значения тепловых потоков, поглощаемых этими поверхностями, определяются следующим образом. Для всех элементов рабочего пространства установки поглощаемый тепловой поток состоит из двух слагаемых:

$$q^{\ddot{n}\ddot{a}\ddot{e}} = q^{1\ddot{n}\ddot{a}\ddot{e}} + q^{2\ddot{n}\ddot{a}\ddot{e}}, \quad (2.65)$$

где $q^{1\text{ногл}}$ – поглощаемый элементом тепловой поток излучения, идущий от ламп напрямую и через отражение от фронтальных поверхностей элементов; $q^{2\text{ногл}}$ – поглощаемый элементом тепловой поток излучения, испускаемого поверхностями других элементов установки.

Для поверхности образцов материала и теплозащиты эти выражения имеют следующий вид:

$$q_i^{\ddot{n}\ddot{a}\ddot{e}} = q_i^{1\ddot{n}\ddot{a}\ddot{e}} + q_i^{2\ddot{n}\ddot{a}\ddot{e}}, \quad (2.66)$$

$$q_{ik}^{1\ddot{n}\ddot{a}\ddot{e}} = A_{ik} \times \sum_{m=1}^{nh} q_2(m) \times [\varphi_{mik} + \varphi_{ms1} \times (1 - A_s) \times \varphi_{s1ik} + \varphi_{ms2} \times (1 - A_s) \times \varphi_{s2ik} + \varphi_{md} \times (1 - A_d) \times \varphi_{dik}]$$

$$q_i^{2\ddot{n}\ddot{a}\ddot{e}} = \sigma_0 \times \varepsilon_{s1i}^{\ddot{i}\ddot{d}\ddot{e}\ddot{a}} \times \varphi_{s1i} \times F_s \times (T_{s1}^4 - T_i^4) + \sigma_0 \times \varepsilon_{s2i}^{\ddot{i}\ddot{d}\ddot{e}\ddot{a}} \times \varphi_{s2i} \times F_s \times (T_{s2}^4 - T_i^4) + \sigma_0 \times \varepsilon_{di}^{\ddot{i}\ddot{d}\ddot{e}\ddot{a}} \times \varphi_{di} \times F_d \times (T_d^4 - T_i^4), \quad (2.67)$$

где $\varepsilon_{s1ik}^{\text{прив}}$, $\varepsilon_{s2ik}^{\text{прив}}$, $\varepsilon_{dik}^{\text{прив}}$ – приведенные степени черноты поверхностей взаимного облучения систем: левый боковой отражатель – i,k -й элемент фронтальной поверхности, правый боковой отражатель – i,k -й элемент фронтальной поверхности, рефлектор – i,k -й элемент фронтальной поверхности, соответственно.

$$\varepsilon_{s1ik}^{\text{прив}} = \varepsilon_{s2ik}^{\text{прив}} = 1/(1/\varepsilon_s + 1/\varepsilon_{ik} - 1); \quad (2.68)$$

$$\varepsilon_{dik}^{\text{прив}} = 1/(1/\varepsilon_d + 1/\varepsilon_{ik} - 1), \quad (2.69)$$

Для поверхностей боковых отражателей:

$$q_{s1}^{\ddot{n}\ddot{a}\ddot{e}} = q_{s1}^{1\ddot{n}\ddot{a}\ddot{e}} + q_{s1}^{2\ddot{n}\ddot{a}\ddot{e}}, \quad (2.70)$$

$$q_{s1}^{1\ddot{n}\ddot{a}\ddot{e}} = A_s \times q_2(m) \times \sum_{m=1}^{nh} [\varphi_{ms1} + \varphi_{ms2} \times (1 - A_s) \times \varphi_{ss} + \varphi_{md} \times (1 - A_d) \times \varphi_{ds} + \sum_{k=1}^{nzk-1} (\sum_{i=1}^{nzk-1} \varphi_{mik} \times (1 - A_{ik}) \times \varphi_{iks1})], \quad (2.71)$$

$$q_{s1}^{2\ddot{a}\ddot{a}\ddot{e}} = \sigma_0 \times \sum_{i=2}^{nzk-2} \sum_{z=2}^{nzk-2} \varepsilon_{iks1}^{i\ddot{d}\ddot{e}\ddot{a}} \times \varphi_{s1ik} \times f_s \times (T_{yik}^4 - T_{s1}^4) + \sigma_0 \times \varepsilon_{ss} \times f_s \times (T_{s2}^4 - T_{s1}^4) + \quad (2.72)$$

$$\sigma_0 \times \varepsilon_{ds}^{i\ddot{d}\ddot{e}\ddot{a}} \times \varphi_{ds} \times f_d \times (T_d^4 - T_{s1}^4),$$

где ε_{ss}^{npue} , ε_{ds}^{npue} – приведенные степени черноты поверхностей взаимного облучения систем: «левый боковой отражатель – правый боковой отражатель», «рефлектор – боковой отражатель», соответственно,

$$\varepsilon_{ss}^{npue} = 1/(2/\varepsilon_s - 1), \quad (2.73)$$

$$\varepsilon_{ds}^{npue} = 1/(1/\varepsilon_s + 1/\varepsilon_d - 1), \quad (2.74)$$

$$q_{s2}^{\ddot{a}\ddot{a}\ddot{e}} = q_{s2}^{1\ddot{a}\ddot{a}\ddot{e}} + q_{s2}^{2\ddot{a}\ddot{a}\ddot{e}}, \quad (2.75)$$

$$q_{s2}^{1\ddot{a}\ddot{a}\ddot{e}} = A_s \times q_2(m) \times \sum_{m=1}^{nh} [\varphi_{ms2} + \varphi_{ms1} \times (1 - A_s) \times \varphi_{ss} + \varphi_{md} \times (1 - A_d) \times \varphi_{ds} + \quad (2.76)$$

$$\sum_{k=2}^{nzk-2} (\sum_{i=2}^{nzk-2} \varphi_{mik} \times (1 - A_{ik}) \times \varphi_{iks2})],$$

$$q_{s2}^{2\ddot{a}\ddot{a}\ddot{e}} = \sigma_0 \times \sum_{i=2}^{nzk-2} \sum_{z=2}^{nzk-2} \varepsilon_{iks2}^{i\ddot{d}\ddot{e}\ddot{a}} \times \varphi_{s2ik} \times f_s \times (T_{yik}^4 - T_{s2}^4) + \sigma_0 \times \varepsilon_{ss} \times f_s \times (T_{s1}^4 - T_{s2}^4) + \quad (2.77)$$

$$\sigma_0 \times \varepsilon_{ds}^{i\ddot{d}\ddot{e}\ddot{a}} \times \varphi_{ds} \times f_d \times (T_d^4 - T_{s2}^4),$$

Для поверхности рефлектора:

$$q_d^{\ddot{a}\ddot{a}\ddot{e}} = q_d^{1\ddot{a}\ddot{a}\ddot{e}} + q_d^{2\ddot{a}\ddot{a}\ddot{e}}, \quad (2.78)$$

$$q_d^{1\ddot{a}\ddot{a}\ddot{e}} = A_d \times q_2(m) \times \sum_{m=1}^{nh} [\varphi_{md} + 2 \times \varphi_{ms} \times (1 - A_s) \times \varphi_{sd} + \sum_{i=2}^{nzk-2} \sum_{k=2}^{nzk-2} \varphi_{mik} \times (1 - A_{ik}) \times \varphi_{ikd}], \quad (2.79)$$

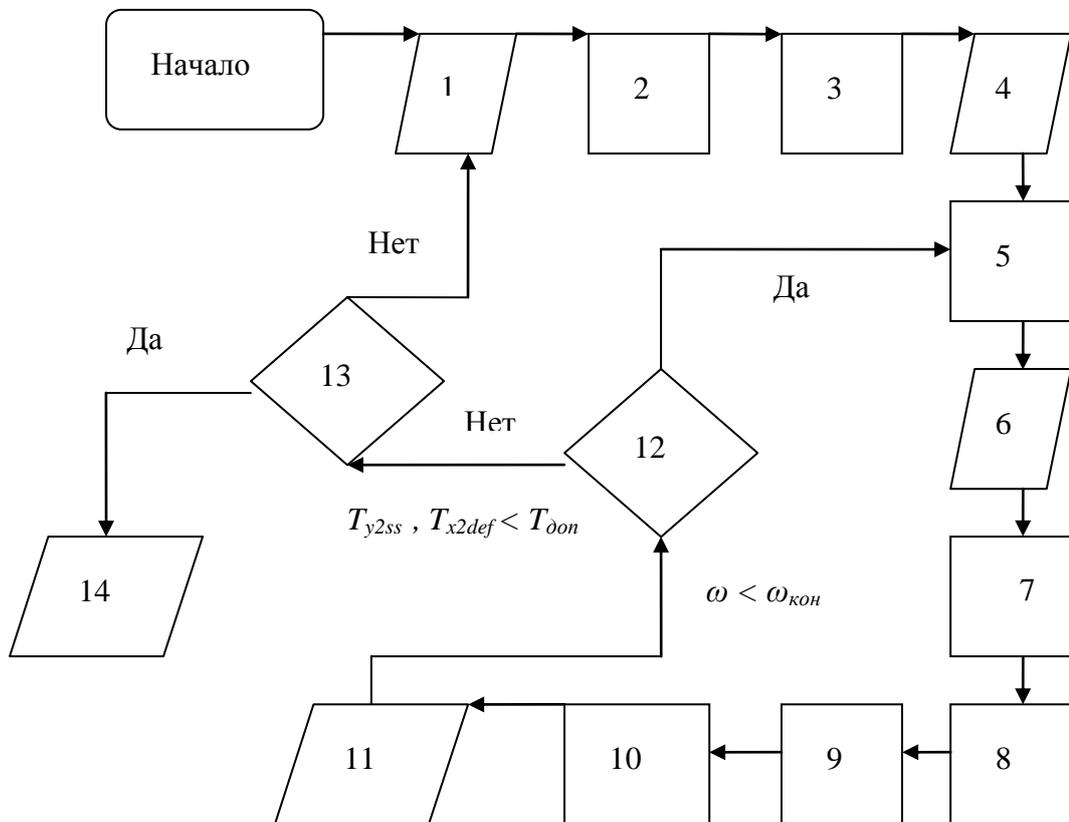
$$q_d^{2\ddot{a}\ddot{a}\ddot{e}} = \sigma_0 \times \sum_{i=2}^{nzk-2} \sum_{k=2}^{nzk-2} \varepsilon_{ikd}^{i\ddot{d}\ddot{e}\ddot{a}} \times \varphi_{dik} \times f_d \times (T_{yik}^4 - T_d^4) + \sigma_0 \times \varepsilon_{ds}^{i\ddot{d}\ddot{e}\ddot{a}} \times \varphi_{ds} \times f_d \times (T_{s1}^4 - T_d^4) + \quad (2.80)$$

$$\sigma_0 \times \varepsilon_{ds}^{i\ddot{d}\ddot{e}\ddot{a}} \times \varphi_{ds} \times f_d \times (T_{s2}^4 - T_d^4),$$

Для решения сопряжённой задачи теплообмена использован итерационный алгоритм. Последовательность выполнения его заключается в следующем. Вначале задают температуру (или закон изменения её в процессе нагрева) на фронтальной поверхности элемента исследуемого материала, входящего в сборку и выбранного в качестве контрольного. Затем эту температуру используют как одно из граничных условий для определения одномерного температурного поля по толщине пакета под этим элементом. Полученное рас-

пределение температур применяют для решения задачи внешнего теплообмена способом итераций, и в результате определяют плотность падающего на эту поверхность теплового потока, и мощность источников тепла (лампы), необходимую для обеспечения заданного режима испытаний. После этого решают задачи внутреннего теплообмена и получают распределение температур в участвующих в этом процессе элементах установки, включая и их поверхности.

Алгоритм программы решения приведен на рисунке 2.3.



1 – ввод данных, определяющих геометрию элементов модели и температурные зависимости ТФС используемых в модели материалов; 2 – вычисление площадей поперечных сечений элементов модели; 3 – вычисление обобщенных угловых коэффициентов излучения; 4 – ввод начальных данных о температурах в элементах модели и на границах; 5 – вычисление начальных значе-

ний ТФС каждого элемента модели; 6 – задание температуры управляющего элемента модели; 7 – вычисление температур в столбце управляющего элемента модели; 8 – вычисление температуры фронтальной поверхности управляющего элемента; 9 – вычисление необходимых теплового потока и мощности нагревателей; 10 - вычисление температур в элементах модели; 11 – присвоение температурам элементарных объёмов и фронтальных поверхностей элементов модели временного шага $\omega+1$ индексов шага ω ; 12 – проверка неравенства $\omega < \omega_{кон}$ для продолжения или окончания выполнения циклической части расчета; 13 – проверка неравенств $T_{x2ss}(\omega_{кон}) > T_{xssзад}$ и $T_{y2def}(\omega_{кон}) > T_{ydefзад}$ для повторения или окончания выполнения расчета; 14 – вывод найденных значений температур $T(j,i,k)$, тепловых потоков $q(\omega_k)$, мощности нагревателей $N(\omega_k)$ для заданных индексов элементарных объёмов в указанные значения временного шага ω_k и конечных значений толщин боковых отражателей L_{xss} и рефлектора L_{ydef} .

Рисунок 2.3– Схема алгоритма решения задачи сопряжённого теплообмена

Структурно программа описанного алгоритма выполнена в виде отдельных блоков:

блок задания граничных условий на фронтальной и тыльной сторонах пакета;

блок задания начальных условий;

блок задания геометрических размеров и конфигурации пакета;

блок определения оптико-геометрических характеристик элементов модели;

блок ТФХ материалов модели;

блоки непосредственного расчета температурного и деформированного состояний элементов пакета;

блок вывода и представления полученных данных для последующей обработки.

2.3.3. Математическая модель двухмерного нестационарного теплообмена в пластине конечных размеров

Математическая формулировка задачи имеет следующий вид:

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y}), \quad (2.81)$$

$$x_{zp} \leq x \leq l_x / 2, \quad 0 \leq y \leq l_y, \quad \tau \geq 0, \quad (2.82)$$

$$\tau = 0, \quad T(x, y) = T_0(x, y), \quad (2.83)$$

$$y = 0, \quad q_{нози} = -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (2.84)$$

$$y = l_y, \quad \alpha_t (T - T_{air}) = -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (2.85)$$

$$x = l_x / 2, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad (2.86)$$

$$x = x_{zp}, \quad \alpha_{zp} (T - T_{air}) = -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2.87)$$

где $l_x/2$, x_{zp} – координаты границ образца по ширине;

α_t , α_{zp} – коэффициенты теплоотдачи тыльной и левой границе образца соответственно.

2.4. Применение математических моделей для минимизации методической погрешности

2.4.1. Применение модели одномерной нестационарной теплопроводности при выборе толщины образца и режима нагрева его поверхности

Одним из критериев выбора являлась величина методической составляющей ε_m приведённой погрешности измерений, которую рассчитывали сравнением априори известных значений коэффициента теплопроводности керамического образца на выборке из 6 точек в области исследуемых температур с результатами расчётов этой характеристики, полученных с помощью ИСР-3 для тех же температур. Файлы исходных данных для ИСР-3 формировали по результатам решения прямой задачи нестационарной теплопроводности для

одномерной математической модели, ТФС которой соответствовали предполагаемым (табличным) значениям исследуемого материала. Расчёты проводили для каждого варианта граничных условий: по темпу нагрева фронтальной поверхности образца, коэффициенту теплоотдачи на его тыльной поверхности и толщине образца. Затем рассчитывали с помощью программы ИСР-3 коэффициенты теплопроводности материала для заданной выборки температур. Последующими вычислениями определяли среднее значение коэффициента теплопроводности этого материала λ_{cp} по табличным данным для выборки из 6 температурных точек. Методическую погрешность результата измерений ε_m рассчитывали, как отношение среднеквадратического отклонения между табличными и рассчитанными значениями коэффициентов теплопроводности к среднему табличному значению λ_{cp} . Расчет проводили по формулам статистической обработки результатов измерений [69]:

$$\lambda_{\bar{n}\delta} = \frac{\sum_{i=1}^{n=6} \lambda_{ti}}{n}, \quad \varepsilon_m = 2,57 \times \left(\frac{\sum_{i=1}^{n=6} (\lambda_{pi} - \lambda_{ti})^2}{n \times (n-1)} \right)^{0,5} / \lambda_{cp}, \quad (2.88)$$

где λ_{pi} , λ_{ti} – значения расчётного и табличного коэффициентов теплопроводности i -ых членов выборок соответственно; n – объём выборки; 2,57 – значение коэффициента Стьюдента для выборки указанного объёма при достоверной вероятности 0,95.

Процесс вычисления коэффициентов теплопроводности программой ИСР-3 является итерационным. Каждой итерации соответствует свой набор коэффициентов теплопроводности для заданной выборки температур. Достоверность полученных результатов может быть оценена величиной методической погрешности ε_m . Результаты такой оценки приведены на рисунке 2.4.

Из приведённой на рисунке 2.4 зависимости можно сделать вывод, что в пределах 2- 5 итераций методическая погрешность не превышает 2 % и в последующих расчётах наиболее достоверные результаты определения теплопроводности соответствуют этой области итерационного процесса.

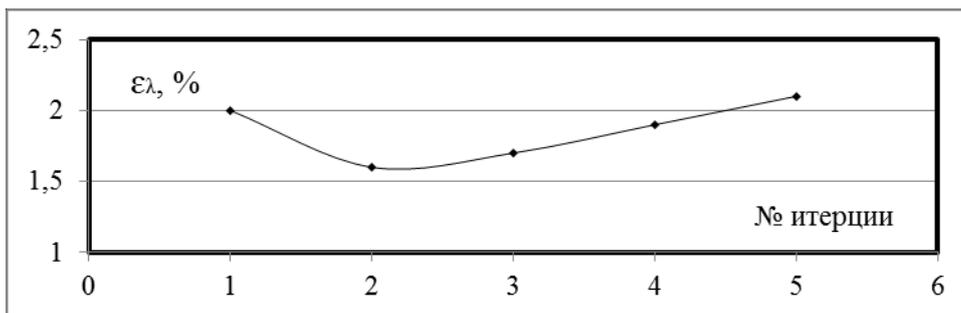


Рисунок 2.4—Зависимость методической погрешности от номера расчетной итерации программы ICP-3

Исходный файл ICP-3 содержит временную последовательность наборов расчетных значений температур в трёх точках образца, расположенных на разном удалении от фронтальной поверхности [2]. Положение промежуточной (второй) точки относительно крайних точек может влиять на точность определения конечного параметра λ . Результаты такого исследования для темпа нагрева фронтальной поверхности 5 К/с образца из кварцевой керамики толщиной 7 мм приведены на рисунке 2.5.

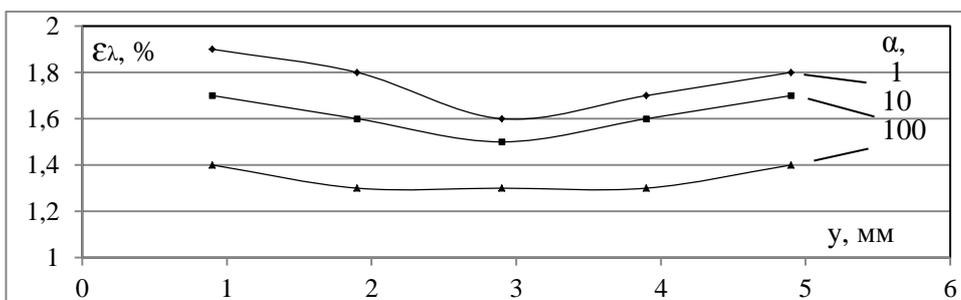


Рисунок 2.5—Зависимость методической погрешности ϵ_m от глубины расположения промежуточного датчика температуры в образце y для различных значений коэффициента теплоотдачи тыльной поверхности α

Влияние темпов нагрева образцов различных толщин на ϵ_m приведено на рисунке 2.6.

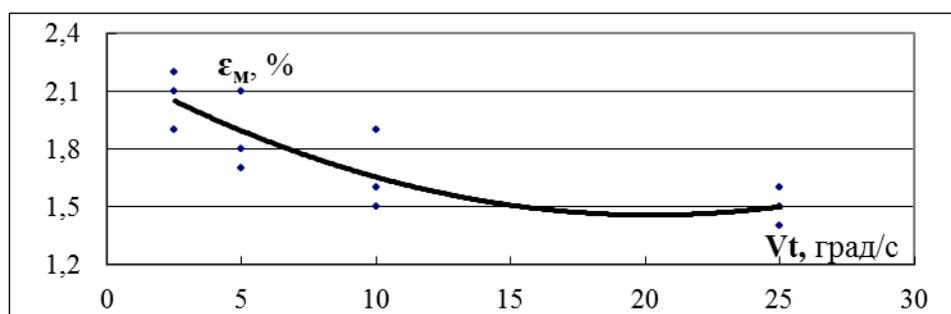
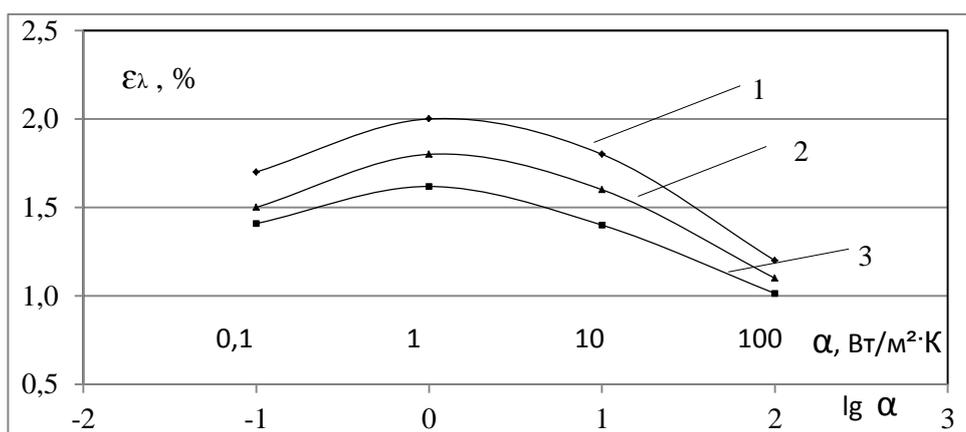


Рисунок 2.6—Зависимость усреднённой по коэффициенту теплоотдачи методической составляющей погрешности эксперимента ϵ_M от темпа нагрева фронтальной поверхности образцов толщин: 3; 7; 10 мм

Приведённые на рисунке 2.6 результаты показывают, что эта составляющая погрешности изменяется в пределах 2,2 – 1,3 % при задаваемых коэффициентах теплоотдачи тыльной поверхности образца от 0,1 до 100 Вт/(м²·град) и изменениях толщины образца от 3 до 10 мм. Такой результат позволяет ограничить объём дальнейших исследований образцами толщиной 7 мм, которая соответствует массовому типоразмеру образцов, применяемых и для других испытаний.

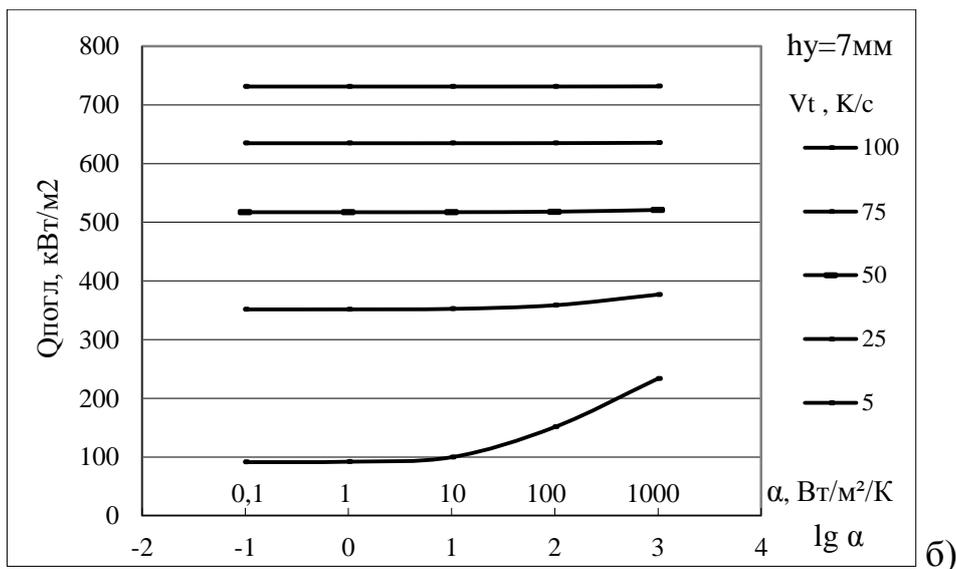
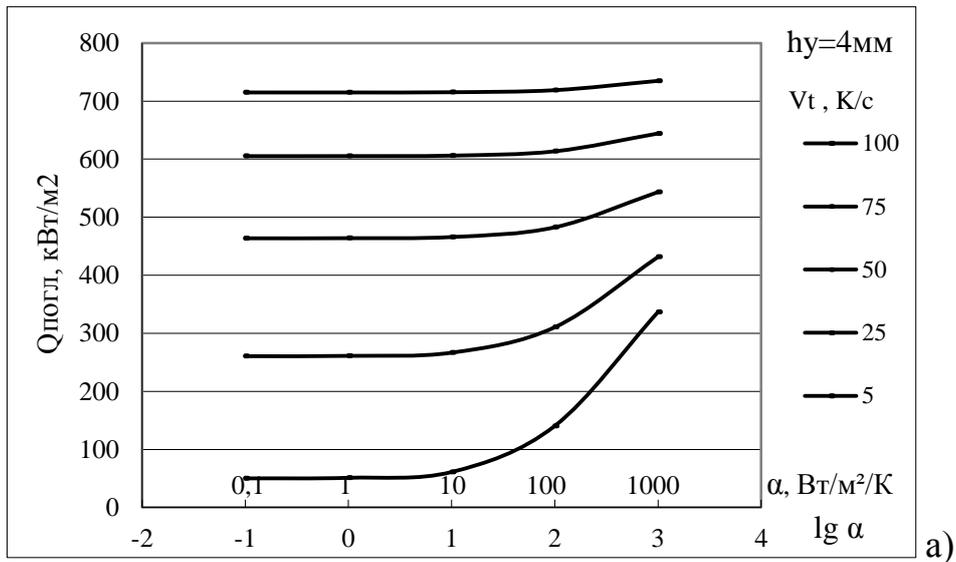
Оценки влияния коэффициента теплоотдачи α тыльной поверхности образцов исследуемых материалов толщиной 7 мм на методическую погрешность ϵ_M для темпа нагрева 5 К/с приведены на рисунке 2.7.



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

Рисунок 2.7—Зависимости методической погрешности эксперимента ϵ_M от α тыльной поверхности образцов исследуемых материалов

Особенность разработанной одномерной модели состоит в том, что в процессе расчета температур вычисляют и граничные условия 2-ого рода для фронтальной поверхности образца в виде значений плотности поглощаемого её теплового потока необходимого для выполнения граничных условий 1-ого рода. Величина этого параметра служит для предварительной оценки мощности нагревателей установки радиационного нагрева, необходимой для реализации режима испытаний. Графические зависимости плотностей теплового потока от перечисленных выше параметров приведены на рисунках 2.8 , 2.9.



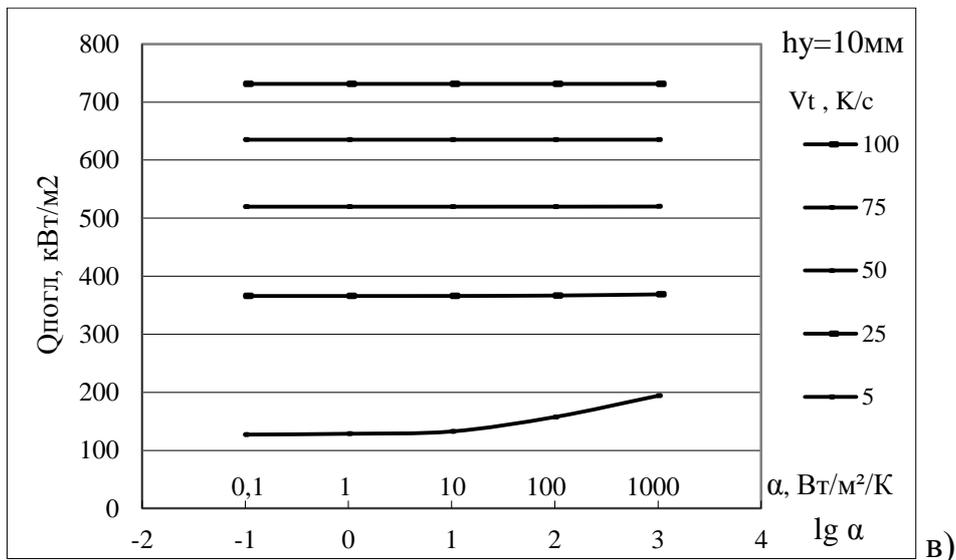
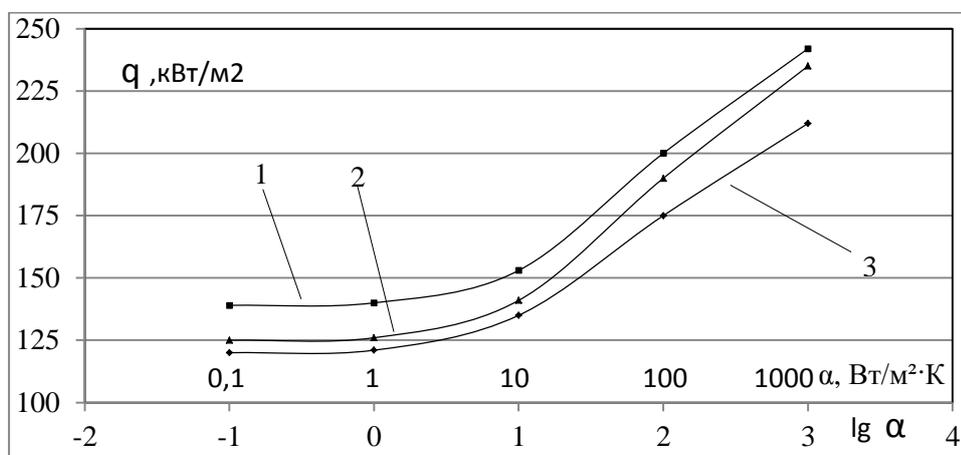


Рисунок 2.8– Зависимости максимальной плотности теплового потока $q_{\text{погл}}$, поглощённого образцом кварцевой керамики различной толщины h_y и темпов нагрева фронтальной поверхности Vt от коэффициента теплоотдачи на тыльной поверхности α

Полученные зависимости показывают, что только в области темпов нагрева 5 град/с условия теплоотдачи влияют на плотность теплового потока. Это влияние становится заметным, начиная с величины α_t близкой к условиям естественной конвекции (10 Вт/(м²·град)). Т.е. условия теплопереноса в образце в процессе испытаний поддаются регулированию. При темпах нагрева выше 25 град/с плотность теплового потока, необходимого для выполнения режима испытаний, существенно возрастает. Сам процесс становится быстротекущим настолько, что граничные условия теплообмена на тыльной поверхности не оказывают на него влияния [69,72,73].

Расчёты, выполненные по трёхмерной модели радиационно–кондуктивного теплообмена, показали, что обеспечение плотности поглощённого образцом теплового потока до 200 кВт/м² может быть реализовано блоком однорядных ламповых нагревателей сравнительно простой конструкции. С точки зрения мощности источников, необходимой для испытаний, режим нагрева фронтальной поверхности образца в пределах 2,5–10 град/с является достижимым.

Проведённые исследования позволяют сузить рамки дальнейшей работы, ограничив её продолжение темпом нагрева фронтальной поверхности образца в 5 град/с.



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

Рисунок 2.9– Зависимости максимальной плотности теплового потока, поглощённого образцами исследуемых материалов толщиной 7 мм, от коэффициента теплоотдачи на тыльной поверхности α для темпа нагрева 5К/с.

Эти данные, не являющиеся полными и окончательными, указывают на возможность применения решений прямой и обратной задач теплопроводности для оптимизации теплофизического эксперимента по температурным режимам и размерам образца в области значений предполагаемых свойств исследуемого материала. Полученные результаты существенно уточняют факторы, обеспечивающие применение программы ICP-3, изложенные в работах [2,24] и относящиеся в большей степени к математической стороне решения обратной задачи теплопроводности. Изложенный выше подход дает возможность определить и минимизировать методическую погрешность эксперимента за счёт выбора толщины и режима одностороннего нагрева образца исследуемого материала.

2.4.2. Применение модели одномерной нестационарной теплопроводности для выбора формы образца

В теплофизических исследованиях методами нестационарных тепловых режимов нагрева получили применение образцы простых форм: пластины или цилиндры. В связи с необходимостью устанавливать в них датчики теплового состояния (термопары), образцы в действительности представляют собой набор элементов, собранных в виде указанных выше форм с закреплёнными в них первичными преобразователями. Такими элементами могут быть тонкостенные диски или пластины с вертикальными пазами для термопар. Целесообразность исследования такой формы представляет практический интерес, т.к. образец, сформированный из уложенных друг на друга пластин, конструктивно изначально имеет ряд недостатков, которые могут повлиять на точность определения ТФХ материала. К их числу следует отнести необходимость обеспечения очень высокой степени плоскопараллельности и чистоты обработки поверхностей элементов образца, контактирующих друг с другом. При наличии пористости в структуре кварцевой керамики и зерен разного размера в стеклокерамике достижение требуемой чистоты поверхностей образца становится проблематичным. Следствием этого являются дополнительные контактные термические сопротивления на границах раздела элементов. Их плоскости перпендикулярны направлению основного теплового потока. Они могут изменять условия теплопереноса в образце по сравнению с идеальным вариантом. Оценочный расчёт контактного сопротивления между пластинами можно выполнить по формуле Шлыкова – Ганина [76]:

$$\frac{1}{R} = \frac{2 \times \lambda_{\bar{n}}}{h_{\bar{n}\partial 1} + h_{\bar{n}\partial 2}} \times (1 - s_e) + \frac{2 \times \lambda_{i1} \times \lambda_{i2}}{\lambda_{i1} + \lambda_{i2}} \times \frac{1}{h_{\bar{n}\partial 1} + h_{\bar{n}\partial 2}} \times s_e, \quad (2.89)$$

где R – тепловое сопротивление контакта, $(\text{м}^2 \cdot \text{град})/\text{Вт}$; λ_c – коэффициент теплопроводности среды, заполняющей промежутки между микрошероховатостями, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$; h_{cp1} , h_{cp2} – средние значения шероховатостей контактной пары, м ; λ_{m1} , λ_{m2} – коэффициенты теплопроводности материалов контактной пары, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$; S_k – относительная доля контактного пятна, приходящаяся на контакт между пластинами.

Оценим влияние контактного пятна l/R на коэффициент теплопередачи для стационарных условий. Приняв для кварцевой керамики пористость в 10 %, можно предположить, что относительная доля воздушной прослойки в контактном пятне, образованном наложением двух пористых поверхностей, может составлять 10 – 20 % или в среднем 15 %. Тогда $S_{\kappa} = 85$ %. Шероховатость поверхностей контакта можно считать равной 0,00004 м. Проведя расчёт по формуле (2.13), получим для l/R значение $1,34 \cdot 10^4$ Вт/(м²·град). Коэффициент теплопередачи между соседними узлами расчётной схемы через пятно контакта для шага сетки расчётной схемы $dy = 0,0002$ м равен

$0,43 \cdot 10^4$ Вт/(м²·град). Тот же параметр при сплошной связи между узлами равен $0,63 \cdot 10^4$ Вт/(м²·град). Т. е. ухудшение теплопередачи в зоне контактного пятна составляет более 30 %.

Для оценки такого предположения математическая модель одномерного теплопереноса была дополнена программой решения одномерной теплонапряжённой задачи деформирования элементов образца конечной длины (60 мм) в процессе нагрева. В этой программе образец материала рассматривали в виде многослойной неограниченной пластины (по числу элементов плюс промежуточные воздушные слои) с меняющимися граничными условиями для слоёв на каждом временном шаге расчётной схемы. Эти условия определяли по коэффициентам теплоотдачи, вычисленных на предыдущем временном шаге по температурам поверхностей граничащих элементов. Это позволяло после вычисления температур в элементах образца и на их поверхностях на каждом временном шаге определять прогиб каждого элемента относительно соседнего нижележащего и вводить новые граничные условия для следующего шага расчётной схемы.

Формулы, используемые для такого расчёта, имеют следующий вид:

$$\alpha_{12}(\tau) = 2,56 \times (T_{i0}(y_1, \tau_{-1}) - T_{i0}(y_2, \tau_{-1}))^{0,25} + \varepsilon \times \sigma_0 \times (T_{i0}(y_1, \tau_{-1}) + T_{i0}(y_2, \tau_{-1})) \times (T_{i0}(y_1, \tau_{-1})^2 + T_{i0}(y_2, \tau_{-1})^2), \quad (2.90)$$

$$-\lambda(T(y_1, \tau)) \frac{\partial T(y_1, \tau)}{\partial y} = \alpha_{12}(\tau) \times (T_{nm}(y_1, \tau) - T_{n\phi}(y_2, \tau)), \quad (2.91)$$

$$\alpha_{12}(\tau) \times (T_{nm}(y_1, \tau) - T_{n\phi}(y_2, \tau)) = -\lambda(T(y_2, \tau)) \frac{\partial T(y_2, \tau)}{\partial y}, \quad (2.92)$$

где $T(y_1, \tau)$, $T(y_2, \tau)$ – температуры элементов соседних слоёв образца, участвующих в теплообмене; $T_{nm}(y_1, \tau)$, $T_{n\phi}(y_2, \tau)$ – температуры тыльной и фронтальной поверхностей этих элементов, соответственно; $\alpha_{12}(\tau)$ – коэффициент теплоотдачи между соседними элементами для временного шага τ расчётной схемы; τ_{-1} – значение предыдущего временного шага; dy – шаг по пространственной координате расчётной схемы равный диаметру применяемых в эксперименте термопар (0,2 мм).

Для каждого номера временного шага τ расчёт возможного прогиба каждого слоя пластины проводили по следующим формулам:

$$kf = \beta / (1 - \mu), \quad T_{\bar{n}\delta} = (\sum_{k=1}^{kn} T_k) / kn, \quad (2.93)$$

$$y_{\bar{n}\delta} = (y_{kn} - y_1) / 2, \quad ly_k = y_k - y_{\bar{n}\delta}, \quad ly = y_{kn} - y_1, \quad (2.94)$$

$$M_k = (T_k - T_{\bar{n}\delta}) \times ly_k, \quad M_{\delta\hat{a}\zeta} = \sum_{k=1}^{kn} M_k, \quad (2.95)$$

$$R_z = \frac{ly^3}{12 \times M_{\delta\hat{a}\zeta} \times dy \times kf}, \quad \varphi = lx / R_z / \pi, \quad dyt = -R_z \times (1 - \cos(\varphi / 2)), \quad (2.96)$$

где kf – коэффициент механических свойств материала образца; β – температурный коэффициент линейного расширения исследуемого материала образца; μ – коэффициент Пуассона; T_{cp} – средняя температура слоя; T_k – температура k -го узла слоя; kn – количество узлов расчётной схемы слоя; y_{cp} – координата нейтральной линии слоя; ly_k – расстояние между k -ым узлом и нейтральной линией в слое; ly , lx – толщина и условная длина слоя; M_k – изгибающий момент k -го слоя относительно нейтральной линии слоя; $M_{рез}$ – результирующий момент температурных напряжений в слое; R_z – радиус изгиба слоя; φ – угол изгиба слоя; dyt – величина прогиба слоя.

Расчёты выполняли для образца толщиной 7 мм. Схема формирования образца в виде составной пластины приведены на рисунке 2.10.

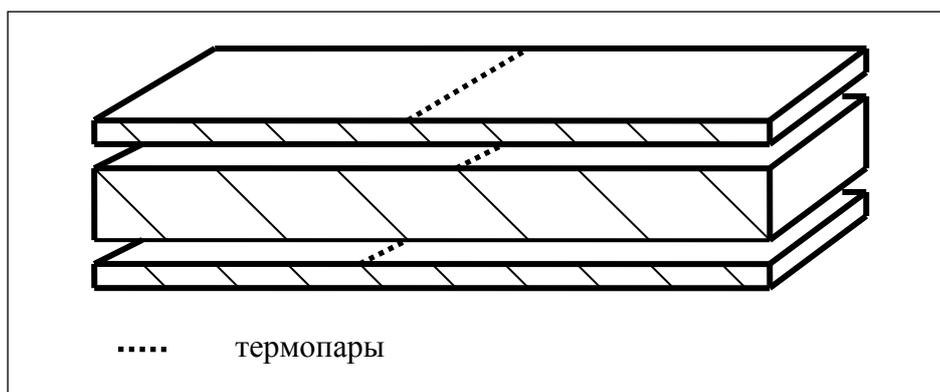
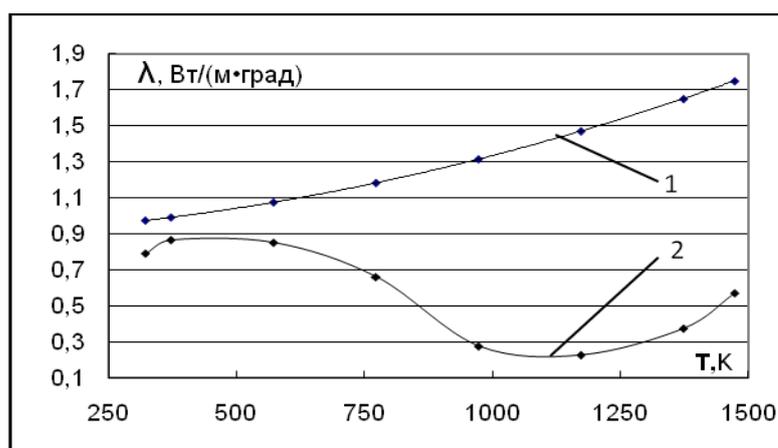


Рисунок 2.10 – Схема образца в виде составной пластины

На рисунке 2.11 приведены результаты расчета коэффициентов теплопроводности керамического образца, выполненные с использованием одномерной математической модели теплопереноса и программы ICP-3 для сплошной и трёхслойной пластины с воздушными зазорами между слоями.



1 – сплошная пластина; 2 – трёхслойная пластина с воздушными зазорами слоями

Рисунок 2.11 – Температурные зависимости коэффициента теплопроводности от формы керамического образца

Расчёты показали, что приведённая погрешность определения коэффициента теплопроводности ε_λ для многослойной пластины превышает 61%. Следовательно, такая форма образцов не является оптимальной [70,71].

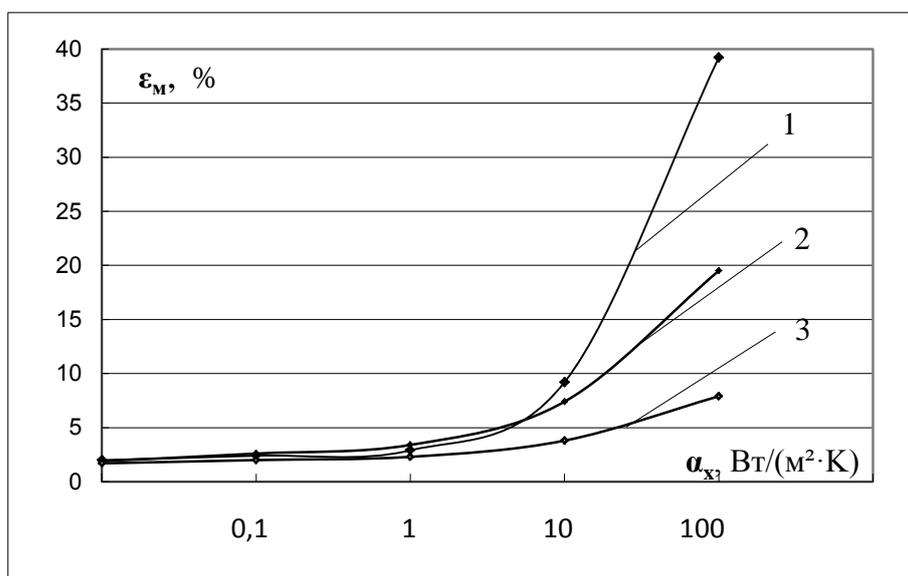
2.4.3. Математическая модель прогнозирования влияния теплопереноса через боковую поверхность образца на методическую погрешность эксперимента

Расчёт коэффициента теплопроводности в образце исследуемого материала программой ICP-3 построен на условии одномерного переноса тепла от фронтальной к тыльной поверхностям. В практике теплофизических экспериментов такое требование не всегда выполнимо, так как распространение тепла в образце имеет трехмерное измерение. Видимо, чем большая доля поглощённого образцом тепла отводится через его боковые поверхности, тем меньше реальный теплоперенос соответствует одномерному. Следствием этого является возможное искажение температурного поля по вертикали теплопереноса по сравнению с идеальным (одномерным) распределением, оказывающее влияние на точность определения искомых параметров – температуры и коэффициента теплопроводности. Представляет интерес оценка влияния режимов испытаний на такое отклонение. Такой характеристикой может быть отношение величины отведенного через боковые поверхности теплового потока к величине теплового потока, прошедшего через тыльную поверхность образца. Моделирование указанных выше условий в рамках решения общей трёхмерной задачи теплопроводности не представляется возможным из-за чрезмерно большого количества элементов в равношаговой пространственной сетке расчетной схемы (более 100000 элементов) и из-за сложности решения задачи на менее объёмной разношаговой сетке даже при условии применения неявной разностной схемы и методов потоковой прогонки. Выход видится в комбинированном подходе, состоящем из двух этапов. На первом этапе из решения общей трёхмерной задачи определяли граничные условия для боковых поверхностей стержней, составляющих образец. Они могут быть сформулированы в виде ГУ 2-го рода через тепловые потоки или ГУ 3-го рода через приведенные к температуре окружающей среды коэффициенты теплоотдачи. Затем решали двухмерную задачу внутреннего теплообмена для части образца, боковые поверхности которой ограничены зоной

содержащей первичные преобразователи температуры, а ГУ на этих поверхностях задавали по результатам решения задачи первого этапа.

Режим нагрева образца определяли заданные ГУ на его фронтальной ($V = 5$ град/с) и тыльной ($\alpha_t = 20$ Вт/(м²·град)) поверхностях. В процессе исследований оценивали влияние условий теплоотдачи боковой поверхности образца α_x на температурные зависимости рассчитанных без поправок на погрешности коэффициентов теплопроводности λ , а также приведённые погрешности их определения ε_m .

Конечные результаты расчётов для образцов исследуемых материалов приведены на рисунке 2.12.



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

Рисунок 2.12 – Зависимость методической погрешности определения коэффициента теплопроводности ε_m от коэффициента теплоотдачи боковой поверхности образца α_x

2.4.4. Применение трёхмерной математической модели нестационарной теплопроводности для обеспечения равномерности температурного поля в образце и оптимизации компоновки проектируемой установки

Математическая модель установки дает возможность, меняя геометрию её внутреннего пространства, количество ламп в блоке нагревателей и их расположение относительно образца и друг друга, оценивать их мощность, плотность теплового потока и неравномерность распределения его по поверхности образца исследуемого материала, добиваясь оптимальных показателей этих параметров.[77,78].

Проведенные расчеты показали, что наиболее удобным теплоизолирующим материалом для боковых отражателей и рефлектора является ТЗМ-10. Необходимая толщина стенок этих элементов, обеспечивающая температуру на их внешних поверхностях не более 308 К, не превышает 0,04 м для всей области исследуемых граничных условий задачи: по темпу нагрева от 2,5 до 50 град/с на фронтальной поверхности и по коэффициенту теплоотдачи от 0,1 до 200 Вт/(м²·град) на тыльной поверхности образцов из керамик на основе диоксида и нитрида кремния.

Были выполнены расчеты по выбору оптимальной конфигурации ламп и их количеству в блоке нагревателей. Они показали, что блок из пяти ламп типа КГ 220-1000-3 при их однорядном расположении от поверхности нагрева на 0,036 – 0,04 м и расстоянии между лампами 0,015 м обеспечивает проведение испытаний образцов исследуемых керамических материалов с темпом нагрева фронтальной поверхности 5 град/с и коэффициентом теплоотдачи тыльной поверхности образца до 40 Вт/(м²·град). Этим достигается выполнение положения оптимизации по обеспечению условий необходимости и достаточности при проведении эксперимента. Такая конфигурация ламп в блоке создает приемлемые при проведении испытаний условия по симметрии и градиенту температур в зоне измерений. Это подтверждают распределения изотерм на поверхности образца с боковой теплоизоляцией из ТЗМ-10 на завершающей стадии испытаний для темпа нагрева фронтальной поверхности образца 5 град/с и температурные поля на глубинах установки термопар в сечении их горячих спаев в процессе нагрева (см. рисунки 2.13, 2.14).

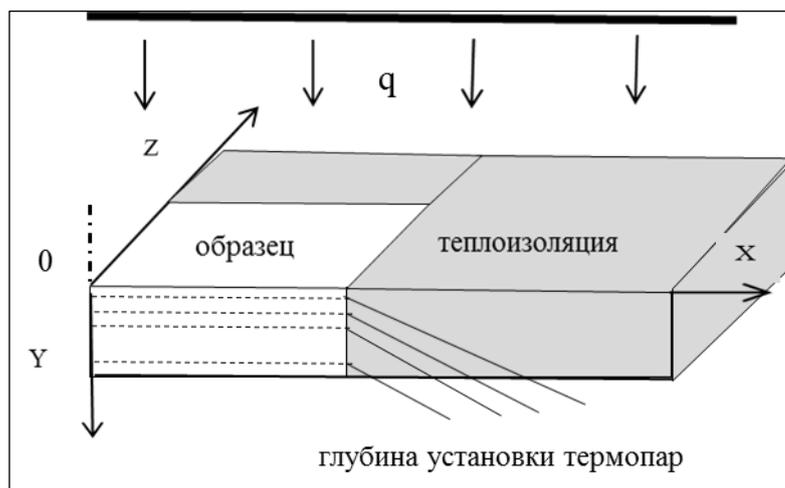
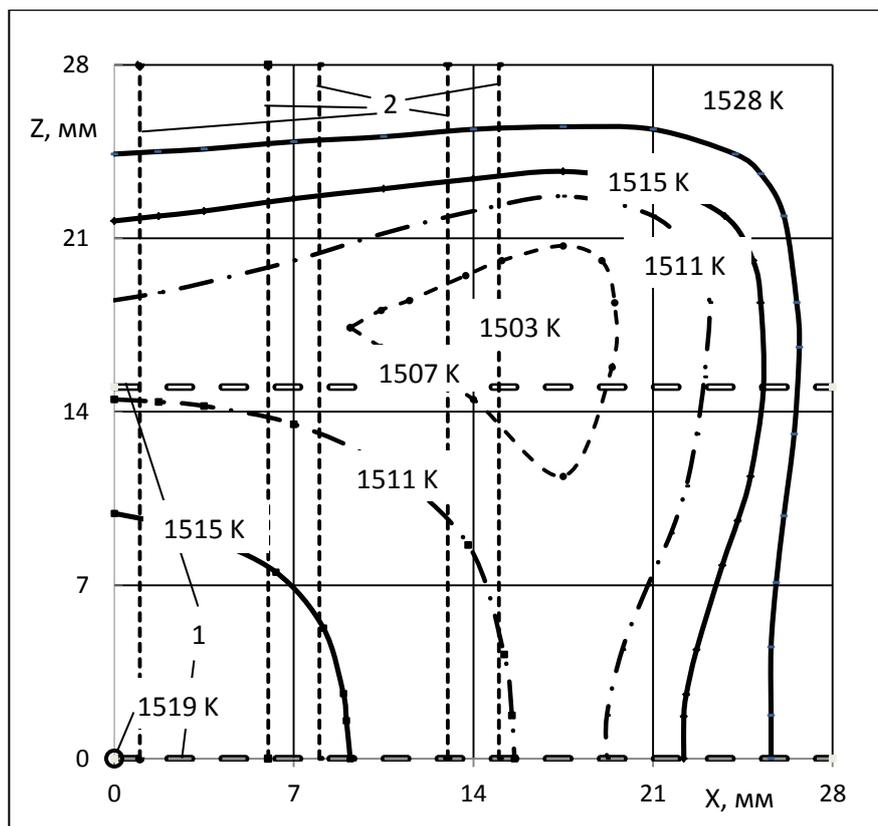


Рисунок 2.13 – Изображение зоны нагрева образца в прямоугольной системе координат

Согласно рисунку 2.13 система координат совпадает с осями симметрии образца. При этом ось OX параллельна оси симметрии нагревателей установки, а ось OZ – оси симметрии стержневых элементов образца исследуемого материала.

Приведённые на рисунке 2.14 изотермы показывают, что градиент температур в зоне расположения термопар не превышает 7 К, а температурное поле имеет симметричную относительно начала системы координат конфигурацию.

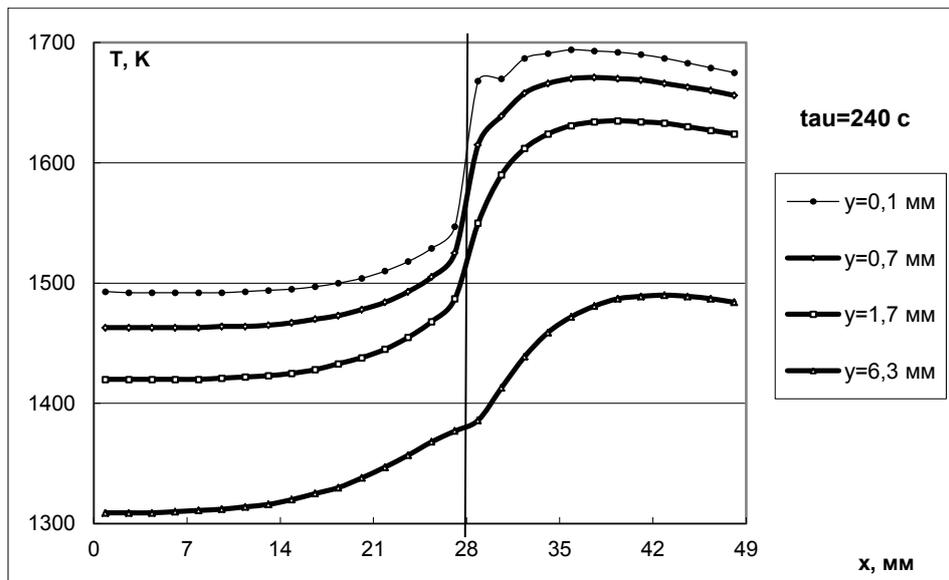


1 – лампы блока нагревателей, находящихся в зоне образца;

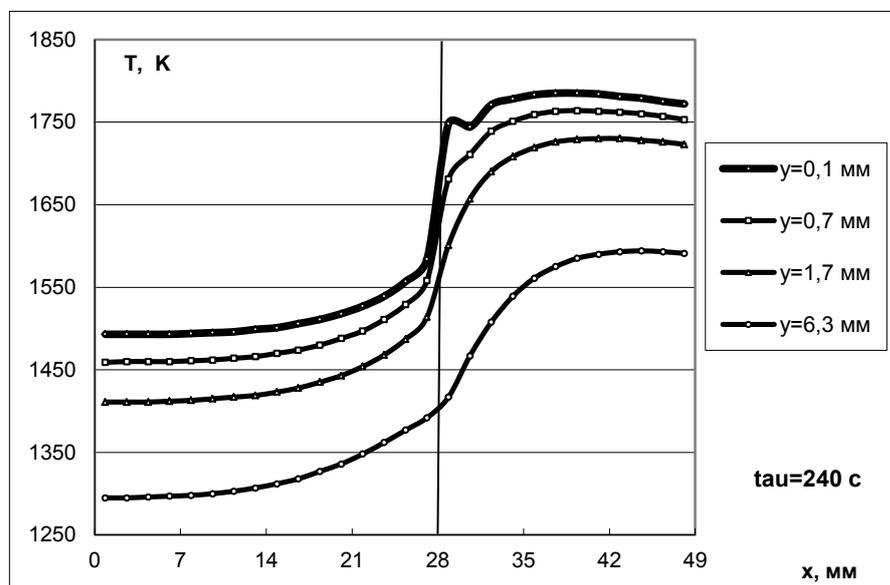
2 – траектории установки термопар в образце

Рисунок 2.14 – Распределение изотерм на фронтальной поверхности образца из кварцевой керамики на 240 с режима нагрева

Расчёты показали, что теплоизоляция боковых поверхностей образца существенно уменьшает отвод тепла через эти поверхности. Распределения температур в вертикальном сечении образца с теплоизолированной боковой поверхностью для образцов из кварцевой керамики и стеклокерамики приведены на рисунке 2.15.



а)



б)

а) – кварцевая керамика; б) – стеклокерамика

Рисунок 2.15– Распределение температур в образцах из кварцевой керамики и стеклокерамики на глубинах установки термопар в плоскости их горячих спаев в процессе нагрева

Приведённые на графиках температурные зависимости для интервала от 0 до 28 мм по шкале 0-Х относятся к образцу, а от 28 до 49 мм – к теплоизоляции. Зона расположения термопар ограничена областью 0 – 14 мм. При этом температуры в слое теплоизоляции существенно выше температур в

зоне образца, и происходит дополнительный боковой перенос тепла от изоляции к образцу. Область распространения такого теплопереноса в образце растёт с увеличением продолжительности испытания и может вносить дополнительную погрешность в определение коэффициента теплопроводности исследуемого материала.

Цифровые данные для прямоугольного образца в зоне от центра симметрии к краю дают перепад в 30 градусов в конце режима, что указывает на влияние размеров и свойств материала теплоизолирующей обечайки на распределение температур в пакете. Приведенные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности размещения термопар вблизи центра симметрии образца в пределах 14 мм. Изменение коэффициента теплоотдачи на этой границе в течение всего режима нагрева является знакопеременным, но не превышает 3 Вт/(м²·град) по абсолютной величине.

2.4.5. Применение трёхмерной математической модели нестационарной теплопроводности для выбора способа формирования образца

Более перспективным по способу формирования является образец в виде составной пластины, набираемой из стержней прямоугольного сечения исследуемого материала [74], приведенный на рисунке 2.16.

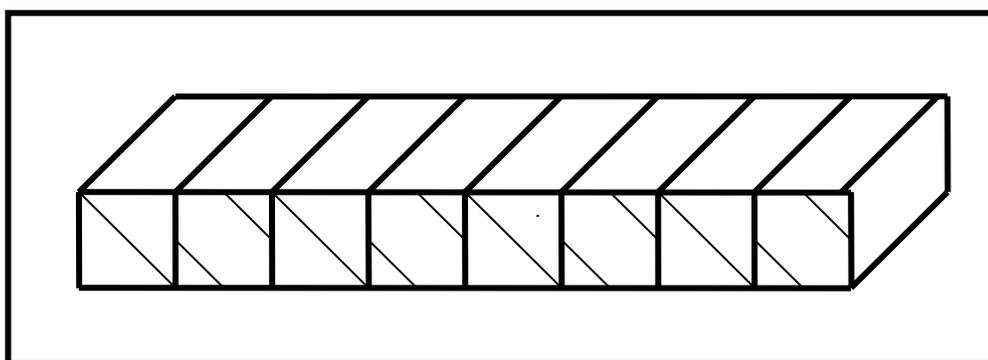


Рисунок 2.16– Схема образца в виде пластины, собранной из стержней

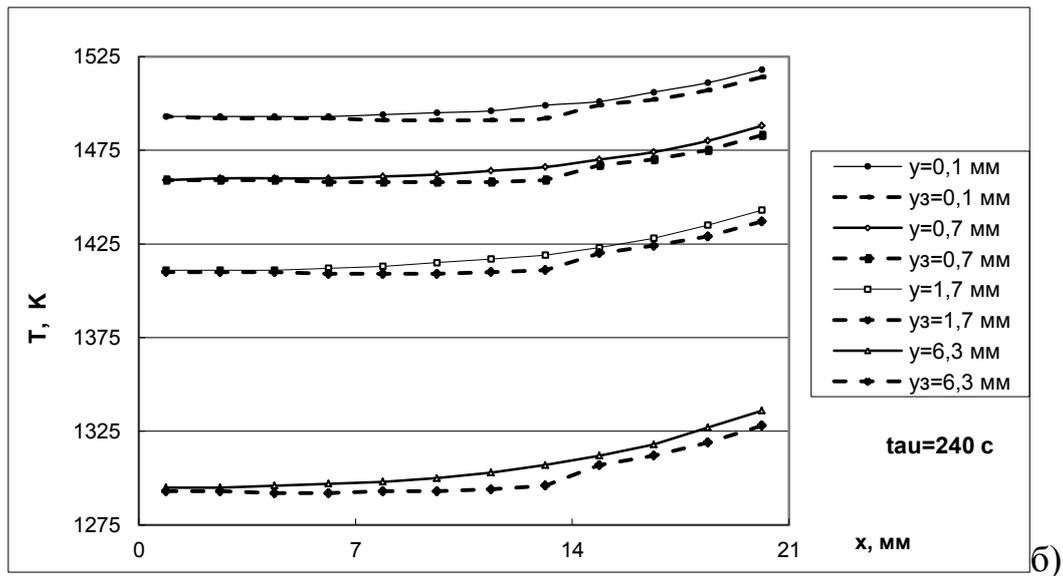
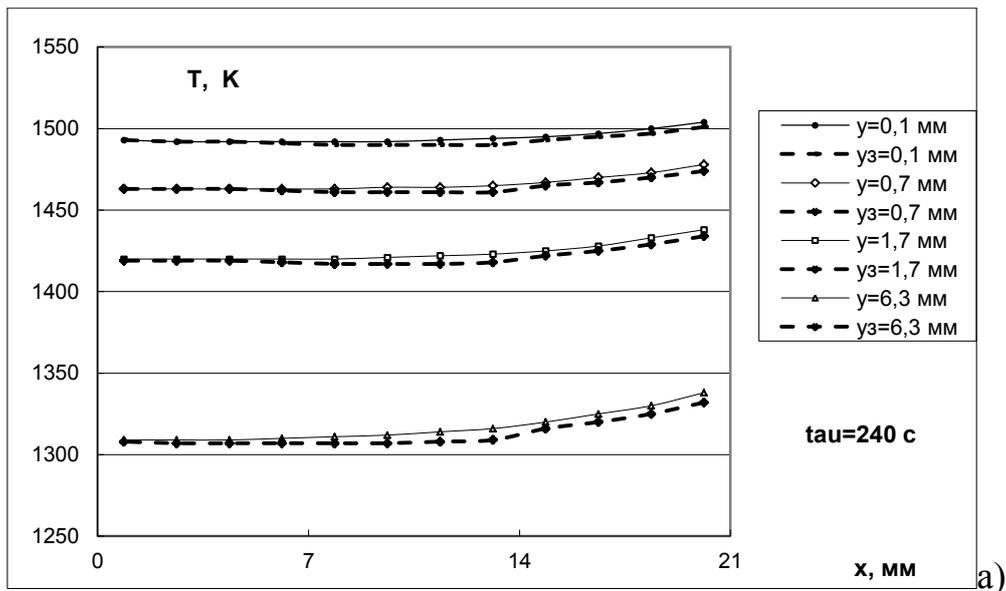
Достоинство такой формы образца заключается в том, что его набирают из стержней прямоугольного сечения, используемых в наиболее массовых по объёму выборок и частоте проведения прочностных испытаниях материала. Направление теплопереноса в образце в процессе испытаний совпадает с по-

верхностями контакта стержней, образующих пластину. Возможность установки термопар в боковых (горизонтальных по плоскости пропила) пазах обеспечивает плотный тепловой контакт термопар со стенками пазов в направлении теплопереноса, усиливающийся по мере прогрева зоны контакта из разности температурных коэффициентов расширения термопары и материала образца. Изготовление пазов на боковых поверхностях стержней достаточно технологично и позволяет точно измерить положение устанавливаемых в образец термопар, относительно фронтальной и боковой поверхностей реза. Технологические возможности оборудования обеспечивают нарезку первых двух пазов на расстояниях 0,7 и 1,7 мм от поверхности нагрева, а третьего на расстоянии 0,7 мм от тыльной поверхности образца.

В рамках исследования рассмотрено влияние условий теплового контакта между стержнями, составляющими образец, на однородность температурного поля в нём. Такую задачу решали с помощью трёхмерной математической модели нестационарной теплопроводности.

На рисунках 2.17 приведены результаты расчета распределения температур в плоскости поперечных сечениях стержней образцов исследуемых материалов, проходящей через горячие спаи термопар. Показанные на рисунках распределения температур в точках установки термопар в образцах из кварцевой керамики и стеклокерамики соответствуют условиям как полного теплового контакта между элементами образца, так и наличия воздушного зазора между ними (цифровые наборы с индексом 3).

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



а) – кварцевая керамика; б) – стеклокерамика

Рисунок 2.17– Распределение температур в исследуемых образцах на глубинах установки термопар на 240 с режима нагрева

Приведённые на рисунках результаты показывают, что неплотный контакт между элементами образца выравнивает поле температур в слое каждого отдельного стержня, делая процесс теплопереноса в нем более одномерным по сравнению с вариантом плотного теплового контакта.

Выполненные расчёты по оценке методических погрешностей показали, что их величины возросли до 4,2% и 3,8 % для вариантов укладки стержней в пакет с плотным контактом и воздушной прослойкой между ними соответственно при коэффициенте теплоотдачи тыльной поверхности $\alpha_t = 20$ Вт/(м²·град).

В тоже время присутствие горизонтальной (боковой) составляющей теплопереноса в образце повышает методическую составляющую погрешности согласно расчётам до $\varepsilon_m = 4,9$ % и 4,3% для указанных вариантов укладки стержней соответственно.

2.4.6. Применение одномерной математической модели теплопроводности к оценке погрешности измерения температуры в образце контактными датчиками

Возможность предварительной оценки точности измерения температур в заданных точках образца термопарными преобразователями является актуальной для любого теплофизического эксперимента. Она позволяет выбрать оптимальную по погрешности схему установки преобразователей, оценить величины эти погрешностей и определить способ их учёта в последующем определении ТФС материала образца.

Исследования проводили на одномерной модели теплообмена в виде многослойной неограниченной пластине для двух вариантов установки первичных преобразователей. В первом варианте все три термопары были установлены в один ряд друг под другом по толщине в указанных выше точках, образуя вместе с образцом семислойную пластину. Во втором варианте каждая из трёх термопар поочерёдно была установлена на соответствующей её номеру глубине образца, что соответствовало трёхслойной пластине, и для такого расположения термопары решали нестационарную задачу. Вторым вариантом соответствует разнесению термопар по горизонтали в реальном образце с целью уменьшения их взаимного влияния. Полученные для каждого варианта результаты сравнивали со значениями температур в соответствующих

расположению термопар точках однослойной пластины – образца материала – той же толщины.

Расчеты проводили в диапазоне указанных выше граничных условий.

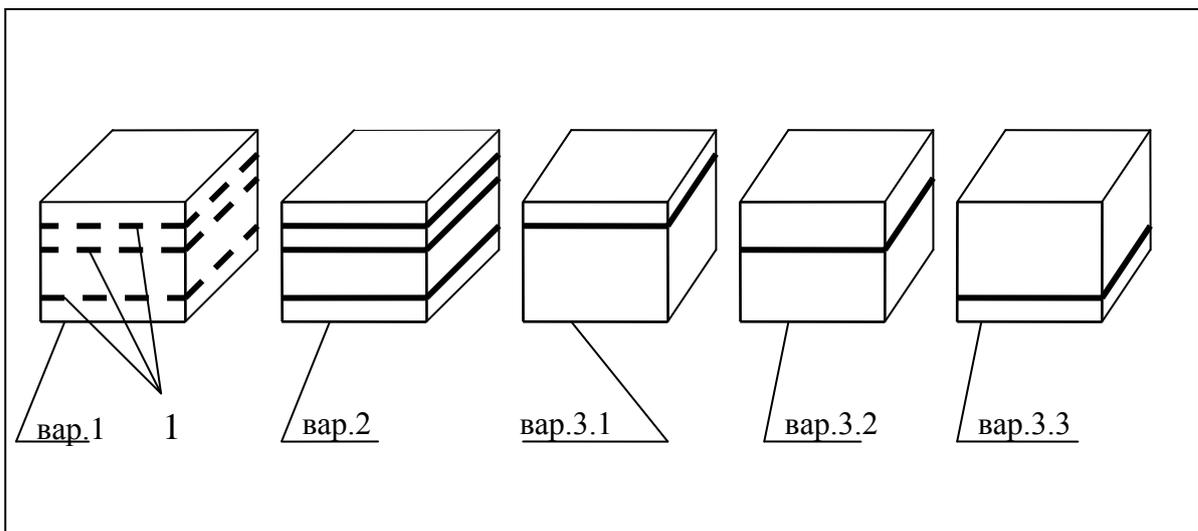
Алгоритм оценки погрешностей сводился к выполнению по разработанному программному обеспечению следующей последовательности операций:

расчет температурного поля в образце исследуемого материала в виде неограниченной однослойной пластины (идеальный вариант) по режиму изменения ГУ 1-го рода на фронтальной поверхности и определение плотности падающего на неё теплового потока (см. рисунок 2.4) для перевода условий нагрева образца на ГУ 2-го;

расчет температурного поля в многослойной пластине по режиму изменения ГУ 2-го рода при замене ТФС слоёв термопар на ТФС материала термопары в приведённых выше вариантах их установки;

сравнение полученных значений температур в термопарных слоях с температурами идеального образца в слоях нахождения этих преобразователей.

Варианты установки термопар в образце в виде пластины приведены на рисунке. 2.18.

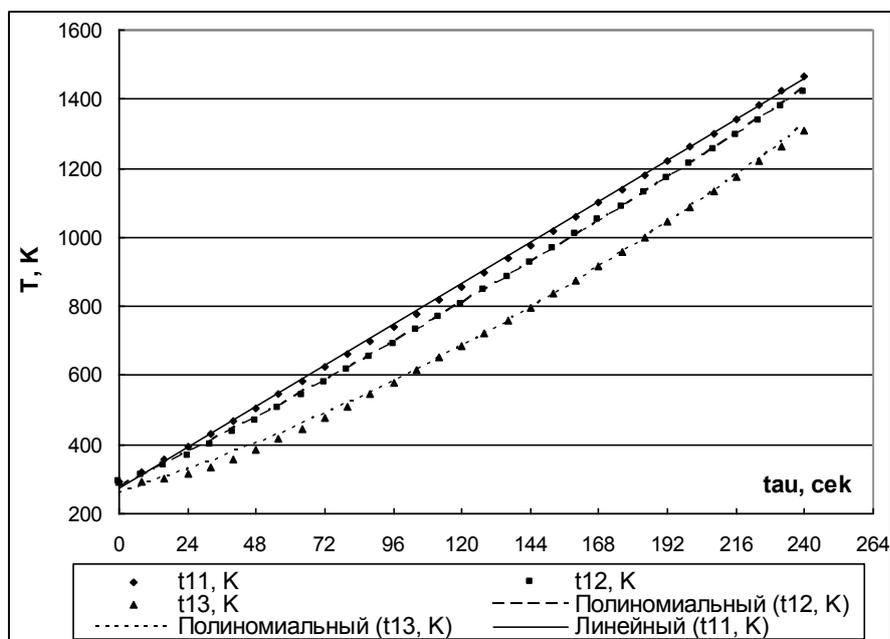


1 – точки измерения температуры;

- вар.1 – однослойная модель без термопар (базовая);
- вар.2 – семислойная модель с тремя термопарами;
- вар.3.1; 3.2; 3.3 – трёхслойные модели с одной термопарой

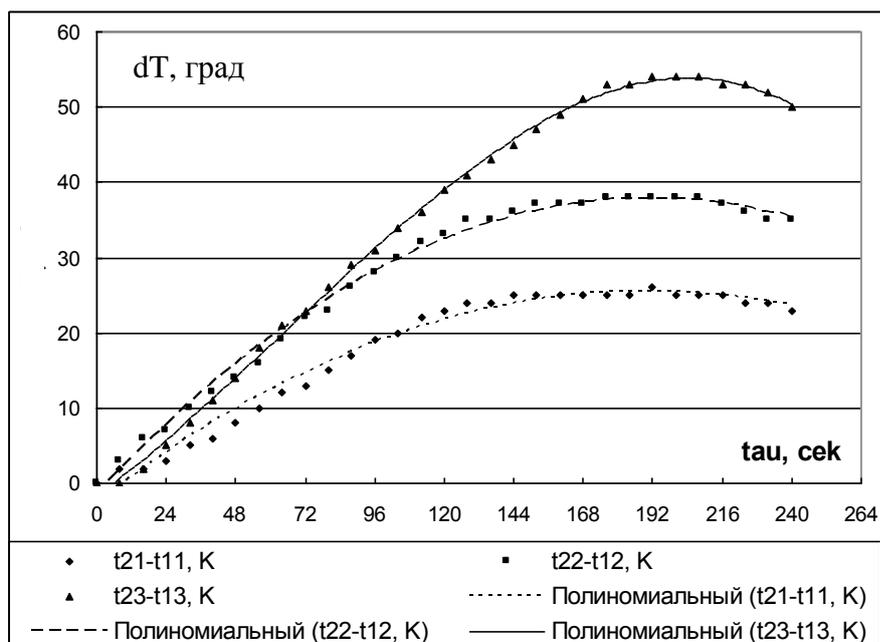
Рисунок 2.18– Схемы вариантов расположения термопар в образце в виде слоёв модели составной пластине

Результаты расчётов температурных полей в пластине из кварцевой керамики толщиной 7 мм при граничных условиях на фронтальной и тыльной поверхностях $V = 5$ град/с и $\alpha_t = 0,1$ Вт/(м²·град), соответственно, приведены на рисунках 2.19 – 2.21.



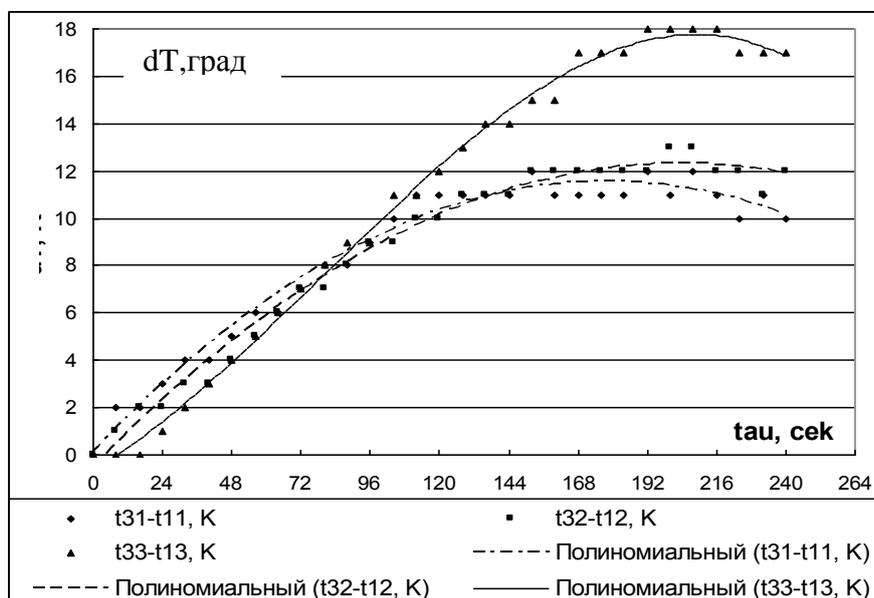
T_{11}, T_{12}, T_{13} – температуры в образце на глубинах 0,7; 1,7; 6,3 мм от фронтальной поверхности соответственно, К

Рисунок 2.19 – Изменения температур в процессе нагрева в неограниченной однослойной пластине для модели варианта 1



dT_1, dT_2, dT_3 – абсолютные погрешности для точке 0,7 ; 1,7; 6,3 мм от фронтальной поверхности образца соответственно

Рисунок 2.20 – Погрешности измерения температур dT термопарами для модели варианта 2 по сравнению с базовым



dT_1, dT_2, dT_3 – абсолютные погрешности для точек 0,7 ; 1,7; 6,3 мм от фронтальной поверхности образца соответственно

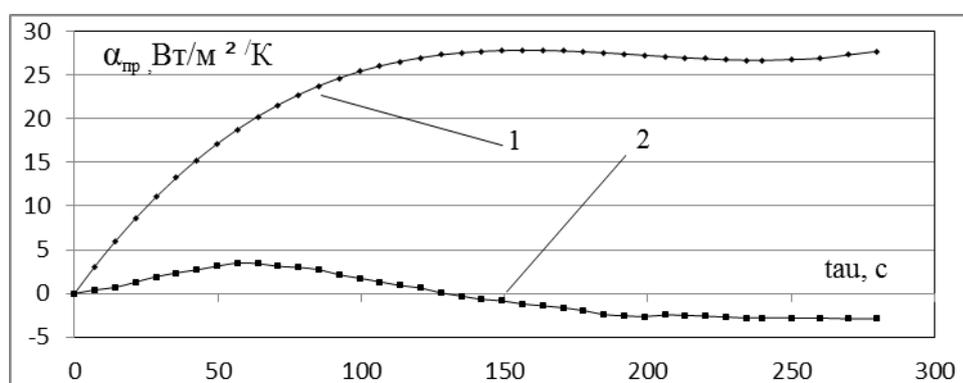
Рисунок 2.21 – Погрешности измерения температур dT термопарами для модели варианта 3 по сравнению с базовой

Зависимости, приведённые на рисунках 2.20, 2.21, можно считать абсолютными погрешностями измерения температур первичными преобразователями в виде хромель-алюмелевых термопар диаметром 0,2 мм при различных вариантах их расположения в образце типа кварцевой керамики в процессе испытаний по указанному выше режиму. Следует отметить, что все погрешности являются положительными и, следовательно, термопары завышают действительные значения температур. Т.е. рассчитанные по ним λ материала будут смещены в более высокую область температур по сравнению с действительной, а сами λ могут иметь более низкие величины. Такое рассогласование результатов усиливается по мере повышения температуры прогрева образца. Проведенные расчёты показали, что одномерная математическая модель теплопереноса в многослойной пластине не в полной мере описывает тепловые процессы, протекающие в образце исследуемого материала и первичных преобразователях в ходе эксперимента. Даже применение способа внесения поправок на термопарное возмущение теплового поля образца с целью снижения методической погрешности измерений не уменьшает общую погрешность эксперимента.

2.4.7. Применение двухмерной математической модели теплопроводности к оценке влияния термопар на методическую погрешность эксперимента

Термопары, устанавливаемые в образец, вносят погрешность в измерения температур [61,] и увеличивают методическую погрешность определения теплопроводности. На точность измерения температуры могут влиять как взаимное расположение их в образце, так и условия теплового контакта термопар с материалом образца. Анализ результатов установки термопар в пазы образца указывает на три варианта теплового контакта: полный контакт термопары с материалом образца, контакт с наличием воздушного зазора с боковой стороны термопары не превышающего её диаметр, контакт с наличием бокового воздушного зазора в виде щели протяжённостью более 3 диаметров.

Двухмерная математическая модель прогнозирования погрешностей по постановке являлась задачей внутреннего теплообмена в части образца, содержащей первичные преобразователи температуры в виде термопар. С геометрической точки зрения она представляет собой поперечный разрез образца 7x7 мм, в сечении горячих спаев термопар. Её граничные условия задавали в виде значений приведённых коэффициентов теплоотдачи для боковой и тыльной поверхностей модели. Расчёты, выполненные в рамках первого этапа на трёхмерной модели радиационно–кондуктивного теплопереноса, показали, что приведённые коэффициенты теплоотдачи через боковые поверхности стержней составной пластины изменяются в процессе испытаний в пределах не превышающих по абсолютной величине 3 Вт/(м²·град). Среднее значение коэффициента теплоотдачи тыльной поверхности равно 20 Вт/(м²·град). Эти величины близки к рассчитанным по термограммам проведённого теплофизического эксперимента значениям приведённых коэффициентов теплоотдачи. Их изменения в процессе испытаний приведены на рисунке 2.22.



1, 2 - коэффициенты теплоотдачи тыльной и боковой поверхности образца соответственно

Рисунок 2.22– Изменения приведённых коэффициентов теплоотдачи в образце в процессе испытаний

Применение мелкой равно шаговой двухмерной координатной сетки ($dy=dx=0,2$ мм) в расчётной схеме дало возможность оценить погрешность измерения температур термопарами в течение всего процесса нагрева образ-

ца, обусловленную как особенностями установки этих термопар в образце, так и состоянием теплового контакта между термопарами и материалом, полученным в процессе выполнения монтажных работ.

Варианты установки термопар в образце с учётом условий их плотного теплового контакта с материалом образца:

вариант 11 – термопары размещены в образце по вертикали в одном столбце на расстояниях 0,7; 1,7; 6,3 мм от фронтальной поверхности;

вариант 21 – термопары разнесены по горизонтали одна от другой с шагом 0,2мм;

вариант 31 – термопары разнесены по горизонтали одна от другой с шагом 0,4мм.

Варианты установки термопар в образце с учётом их одностороннего бокового воздушного зазора с материалом образца:

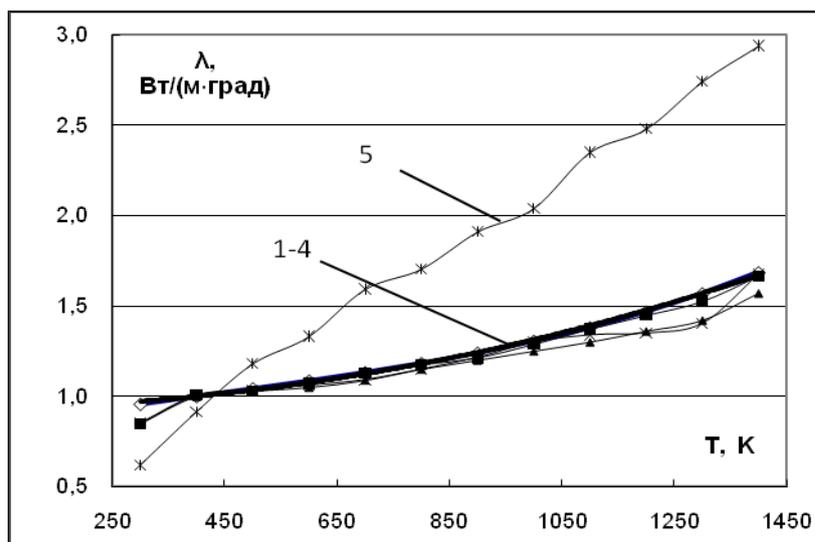
вариант 12 – термопары расположены в образце аналогично варианту 11, но имеют воздушный зазор 0,2 мм;

вариант 22 – термопары расположены в образце аналогично варианту 21, но имеют воздушный зазор 0,2 мм;

вариант 32 – термопары расположены в образце аналогично варианту 31, но имеют воздушный зазор 0,2 мм;

вариант 23 – термопары расположены в образце аналогично варианту 21, но имеют воздушный зазор в виде щели 0,6 мм.

Результаты расчётов коэффициентов теплопроводности для описанных выше способов установки термопар в боковых пазах образца из кварцевой керамики приведены на рисунке 2.23.



1-4 – воздушный зазор 0,2 мм; 5 – воздушный зазор для термопар от верхней к нижней 0,4; 0,6; 0,8 мм соответственно

Рисунок 2.23 – Температурные зависимости теплопроводности с учётом взаимного расположения термопар в образце и бокового воздушного зазора между ними и материалом

Выполненные согласно программе ICP-3 расчёты теплопроводности показали, что для исследованных условий даже без внесения поправок в показания термопар приведённая методическая погрешность ϵ_m для вертикального расположения термопар друг под другом не превышает 6 %, при их смещении по горизонтали на 0,4 мм – 5 %, при смещении на 0,2 мм – 4 % для кварцевой керамики. Для стеклокерамики аналогичные условия заделки термопар в образце приводят к следующим значениям методической погрешности 7 %, 6 %, 4% соответственно. Для керамики из нитрида кремния 7 %, 4 %, 3 %. При установке термопар в пазы образца с воздушным боковым зазором в виде щели превышающим 0,3 мм $\epsilon_m = 42$ % для кварцевой керамики, $\epsilon_m = 48$ % для стеклокерамики, $\epsilon_m = 20,5$ % для нитрид кремниевой керамики.

2.5. Выводы к главе

1. Разработана математическая модель сопряжённого радиационно-кондуктивного нестационарного теплообмена для оценки теплового состояния элементов установки радиационного нагрева в процессе проведения испытаний по определению ТФС исследуемых материалов. Показана целесообразность применения такой модели при выполнении проектных работ по созданию установок радиационного нагрева образцов.

2. Проведены исследования по оценке погрешностей определения ТФС с помощью программы решения КОЗТ ICP-3 для образца в виде пластины толщиной 7 мм, полностью охватывающей диапазон толщин оболочек натуральных конструкций. Расчёты показали, что для темпов нагрева образца из кварцевой керамики 5–15 град/с приведённая погрешность определения коэффициента теплопроводности находится в пределах 5–6%. Обосновано применение скорости нагрева фронтальной поверхности образца равной 5 град/с и приведённых коэффициентов теплоотдачи на тыльной и боковой поверхностях, изменяющихся в процессе испытаний в пределах от 0 до 30 Вт/(м²·град) и от -3 до 3 Вт/(м²·град) соответственно.

3. Разработана двумерная математическая модель для оценки погрешности сигналов термопар, установленных в образце. Расчёты показали, что этот параметр зависит от условий нагрева и охлаждения фронтальной и тыльной сторон образца и значения коэффициента теплоотдачи через его боковые поверхности.

4. Показано, что при соблюдении указанных условий испытаний определение коэффициента теплопроводности допустимо проводить без внесения поправок в показания термопар

5. На основании расчетов установлено, что в качестве образца для определения ТФС исследуемого материала целесообразно применение составной пластины из 8 стержней квадратного сечения размерами 7·7·60 мм каждый.

3. Автоматизированный стенд для теплофизических исследований керамических материалов

3.1. Предпосылки создания.

В первой главе было показано, что в настоящее время для исследования теплофизических свойств керамических материалов разработаны новые методы, обладающие рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами. В частности, они позволяют в десятки раз сократить продолжительность экспериментов, расширить температурный диапазон экспериментальных данных, одновременно проводить испытания нескольких образцов в идентичных условиях. Для практического использования указанных методов существующее испытательное оборудование малоприспособно, так как или не позволяет достигать нужного уровня температуры за приемлемое время, или для этого нужны неоправданно большие энергетические затраты. В связи с этим возникла необходимость в создании нового оборудования с более высокими техническими и эксплуатационными характеристиками, учитывающими возможности современной микроэлектроники, вычислительной техники и уровень разработок необходимого программного обеспечения [78,79]. Его структура имеет модульный принцип комплектования. Она должна включать в свой состав непосредственно установку, создающую необходимый тепловой режим испытаний, систему задания и управления этим режимом, информационно – измерительную систему (ИИС) для измерения и сбора данных от первичных преобразователей о температурном поле объекта исследований в процессе работы, устройство сопряжения, компьютер. Для такого оборудования необходимо программное обеспечение (ПО) для решения указанных выше задач, хранения первичной информации и подготовки файла экспериментальных данных требуемого формата для определения ТФС исследуемого материала. Последняя программа также может быть реализована на этом же компьютере. Комплекс может быть разработан в двух вариантах:

с независимым от ЭВМ блоком управления режимом нагрева образцов при использовании программируемого автономного регулятора;

с управлением режимом испытаний через компьютер.

Последний вариант, являясь более сложным в исполнении, позволяет, прогнозируя гипотетические неисправности системы, разработать ПО, которое обеспечит конструктивную реакцию на ситуации, возникшие в процессе нагрева.

Структурная схема такого комплекса представлена на рисунке 3.1.

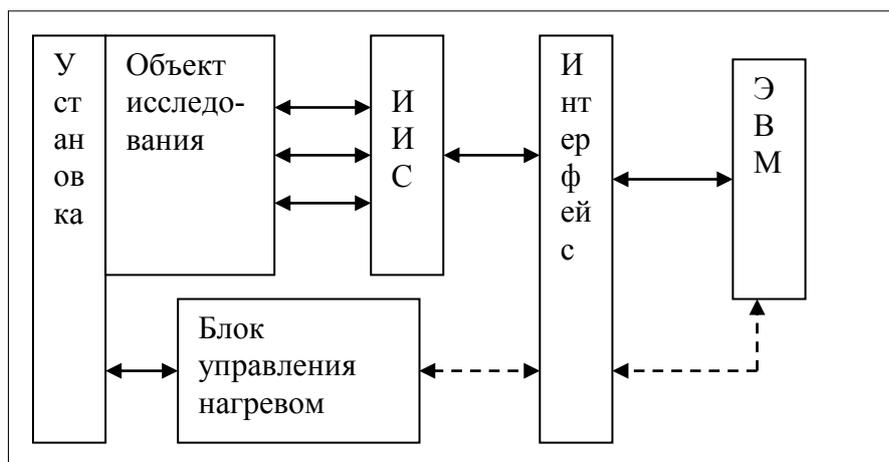


Рисунок 3.1– Структурная схема автоматизированного стенда.

При проектировании экспериментальной установки основными условиями успешного решения поставленной задачи являлись:

обеспечение скоростного нагрева фронтальной поверхности образцов материала до высокой температуры с большой степенью равномерности по этой поверхности и перепадом температур по толщине пакета исследуемого материала, удовлетворяющим условиям применения программы ICP-3 [24];

снижение времени подготовки эксперимента, компактность, мобильность и высокая ремонтпригодность.

Для выполнения этих условий было предложено оснастить установку сменным нагревательным блоком, собранным из галогенных ламп накаливания (ГЛН). Последние обладают меньшей по сравнению с другими видами

нагревателей инерционностью и обеспечивают в сборке регулируемое по равномерности облучение поверхности образцов и достаточно высокий, особенно в области высоких температур, КПД при компактных размерах.

Это решение позволяет создать необходимые условия нагрева образцов, быструю замену нагревательного блока или отдельного источника. Также с целью сокращения времени подготовки эксперимента и повышения ремонтно-пригодности было предложено в конструкции установки использовать выдвижной поддон со съёмным водоохлаждаемым приспособлением, на котором крепятся образцы и измерительный узел с разъёмным соединением первичных преобразователей температуры со средствами управления режимом испытаний и регистрации экспериментальных данных.

Для уменьшения габаритных размеров и снижения массы экспериментальной установки с учетом высоких температур нагрева образцов, при выборе теплоизоляции предпочтение было отдано материалам на основе неорганических волокон [77,78].

Исходя из этих соображений, были сформулированы технические условия для проектирования экспериментальной установки

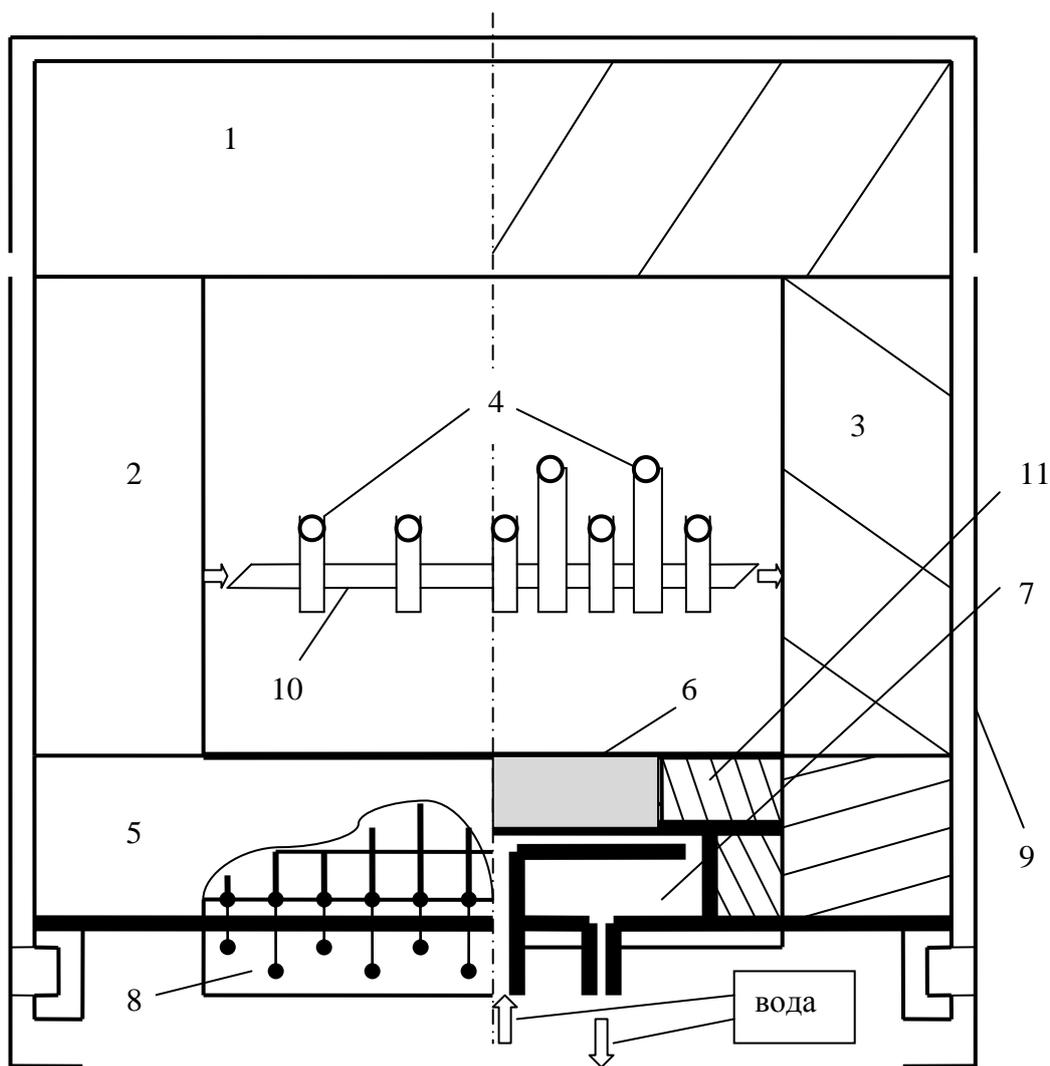
- габариты - не более $450 \times 450 \times 450$ мм³;
- размер рабочего пространства - $150 \times 150 \times 100$ мм³;
- масса - не более 10 кг;
- питание - 220 В, однофазная сеть;
- исполнение конструкции - в «настольном» варианте;
- исключение контакта подвижных частей установки с теплоизоляционным слоем;
- температура наружного кожуха установки - не более 330 К (≈ 60 °С);
- подготовка установки к эксперименту - не более 1 ч;
- равномерный нагрев фронтальной поверхности образцов до максимальной температуры 1600 К потоком теплового излучения (степень неравномерности падающего потока не более 5 %);

– охлаждение (при необходимости) тыльной поверхности образца по температурному режиму, обеспеченному заданным заранее расходом охлаждающей жидкости (воды).

– нагреватели - ГЛН;

- охлаждение токоподводов ГЛН до температуры не более 330 К - водяное.

Схематическое изображение установки приведено на рисунке 3.2.



1 – рефлектор; 2,3 – боковые отражатели;

4 –одно (двух) рядные нагреватели; 5 – выдвигной поддон;

6 – образец исследуемого материала; 7 - холодильник;

8 – измерительный узел; 9 – защитный кожух;

10 – охлаждаемые токоподводы ламп;

11 – теплоизоляция образца и холодильника

Рисунок 3.2– Блок-схема установки

При проработке проектно-конструкторских решений основными задачами являлись выбор количества источников нагрева, их шаг между собой, оптимальное расстояние от фронтальной поверхности образцов, а также толщины теплоизолирующих рефлектора и боковых отражателей, удовлетворяющие требованиям безопасной эксплуатации такого оборудования по температурам на защитном кожухе.

Расчёт параметров блока нагревателей проводили на тепловой модели сопряжённого трёхмерного радиационно-кондуктивного теплообмена, описание которой приведено в главе 2 настоящей работы. Расчёты показали, что для обеспечения заданного режима испытаний $V_t = 5 \text{ K/s}$ и $\alpha_t = 0,1\text{-}35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ достаточно мощности в 5 кВт т.е. пяти ламп КГ 220-1000-3. При этом градиент температур на фронтальной поверхности в зоне установки термопар не превышает 7 градусов от центра симметрии образца к периферии. С учётом возможного ужесточения режима испытаний по скорости нагрева фронтальной поверхности образца и интенсивности теплоотвода с тыльной поверхности блок нагревателей может иметь 9 ламп.

В конструкции установки применяют теплоизоляцию, уменьшающую отвод теплоты нагревателей из камеры нагрева в окружающую среду, обеспечивая тем самым высокую (до 1400 К) температуру поверхности образца и приемлемую (не выше 330 К) температуру внешней поверхности установки.

Выбор материала и толщины теплоизоляционного слоя проводили на той же модели, что и расчёт нагревателей установки. Исходя из расчета заданная температура (330 К) при использовании материала ТЗМ-10 обеспечивается толщиной в 0,05 м для дефлектора и боковых отражателей.

3.2. Установка радиационного нагрева.

Разработанная экспериментальная установка «УТРО-6М», входящая в состав экспериментального стенда, позволяет проводить исследования ТФХ конструкционных керамических материалов в температурном диапазоне 20 – 1700 К [78]. Основные технические характеристики установки приведены в таблице 3.1.

Основные технические характеристики установки «УТРО-6М»

Таблица 3.1

№	Характеристика	Значение
1	Плотность теплового потока на фронтальной поверхности образца, кВт/м ²	240
2	Тип нагревателей:	ГЛН типа КГ 220–1000–3
3	Габаритные размеры:	
	длина, мм	304
	ширина, мм	304
	высота, мм	450
4	Размеры рабочего пространства:	
	длина, мм	150
	ширина, мм	150
	высота, мм	70
5	Максимальные размеры образца:	
	диаметр (длина/ширина), мм	50 (60x60)
	толщина, мм	10
6	Масса, кг	9,2
7	Электропитание	1×220 В, 50Гц
8	Максимальная потребляемая мощность, кВА	10

9	Максимальная температура образца, К	1600
10	Продолжительность испытаний, мин	15

Установка состоит из пяти основных частей: корпуса, свода, нагревательного блока, измерительного узла и подвижной части – поддона.

Корпус состоит из рамы, внешней облицовки в виде стального листа, теплоизоляции, опор и токоподводов. Рама выполнена сварной из профильной стальной трубы. Крепление внешней облицовки и опор – при помощи винтов. В опорах имеются четыре прижимных винта, служащие для устранения конструктивного зазора, предусмотренного для удобства перемещения поддона внутри установки и исключения разрушения теплоизоляции. На прижимные винты накручены контргайки, являющиеся ограничителями вертикального перемещения поддона, которое может привести к разрушению теплоизоляции корпуса.

В сменных нагревательных блоках используются галогенные лампы накаливания типа КГ–220–1000–3. Максимальное количество ламп в нагревательном блоке – 9.

Электропитание к ГЛН подводится через водоохлаждаемые токоподводы, которые представляют собой трубу со штуцерами на концах. Через штуцеры в токоподводы подается охлаждающая жидкость. На трубе с определенным шагом установлены пластины, на которых крепятся цоколи нагревателей. Пластины и штуцеры выполнены из сплава Л60, труба – из сплава Л63.

Токоподводы крепятся к корпусу через электроизоляционные шайбы.

Свод состоит из рамы, внешней облицовки из стального листа, ручек и теплоизоляции. Рама выполнена сварной из стальной профильной трубы. Ручки выполнены из стального прутка. Свод монтируется на корпусе при помощи четырех шпилек и гаек-барашков.

Поддон представляет собой отбортованный стальной опорный лист с теплоизоляцией и ручкой. На опорном листе закреплены боковые и задняя стенки, ножки и водоохлаждаемое приспособление.

Водоохлаждаемое приспособление имеет паянный корпус из сплава Л60 и набор деталей (кронштейны, винты, гайки) для крепления образца в приспособлении. При помощи втулок, винтов и гаек приспособление закреплено на поддоне.

Для теплоизоляции установки применяется материал ТЗМК-10. На своде и на корпусе теплоизоляция закреплена на клее, а на поддоне уложена отдельными блоками между боковыми стенками поддона и элементами водоохлаждаемого приспособления.

Экспериментальные образцы исследуемых материалов представляют собой составную пластину общим размером 60x56x7 мм, собранную из 8 стержней квадратного сечения 60x7x7.

Измерительный узел состоит из съемного водоохлаждаемого приспособления, крепящегося на поддоне. Водоохлаждаемое приспособление предназначено для увеличения перепада температуры по толщине образца при измерениях ТФС, крепления экспериментального образца и разъёмного измерительного устройства – передатчика сигналов первичных преобразователей температуры.

Корпус приспособления изготавливается из материала с хорошей теплопроводностью, например, латуни. Через внутреннюю полость прокачивается охлаждающая вода, которая поступает и отводится через штуцеры, соединенные с гидравлической системой экспериментального комплекса при помощи гибких пластмассовых или резиновых шлангов.

Во избежание нагрева открытых частей корпуса на них наклеивается слой теплоизоляции ТЗМК-10 (4). Для фиксации экспериментальных образцов (1) могут быть применены подпружиненные керамические кронштейны (3). Для снижения термического сопротивления между тыльной поверхностью образцов и водоохлаждаемого приспособления на рабочую поверхность

последнего предварительно наносится слой теплопроводной пасты КППТ-8. Схема приспособления и сборка приспособления приведены на рисунке 3.3.

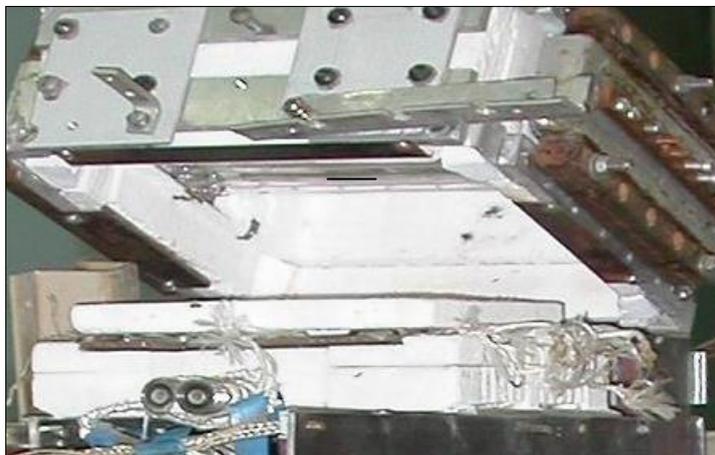


Рисунок 3.3– Общий вид сборки в составе образца исследуемого материала, теплозащитной плиты и водоохлаждаемого приспособления.

3.3. Средства управления режимом нагрева и регистрации экспериментальных данных.

Особенностью современных физических экспериментов является большое количество получаемой информации и потребность в высокой скорости ее обработки [33]. Наиболее рациональный путь удовлетворить поставленным требованиям – это использовать автоматизированные системы (АС), построенные на базе информационно–измерительной системы и ЭВМ. Установка «УТРО-6М» является составной частью одного из вариантов экспериментального стенда, который оборудован подобной системой.

АС решают задачи по регистрации информации, поступающей от измерительных датчиков, ее отображение и сохранение (архивация). В ней информация, характеризующая состояние исследуемого объекта, подвергается обработке, включающей следующие основные этапы:

преобразование информации в аналоговые или цифровые электрические сигналы (осуществляется при помощи измерительных датчиков);
 сбор информации с измерительных датчиков;
 аналоговое (усиление, фильтрация и др.) преобразование информации;
 аналогово-цифровое преобразование информации;
 передача информации в цифровом виде;
 визуализация (оперативный вывод) информации в цифровом и графическом виде;
 сохранение информации в устройствах длительного хранения;
 математическая обработка информации.

На рисунке 3.4. в общем виде представлена взаимосвязь между техническими средствами АС.

В зависимости от сложности поставленной задачи АС могут иметь многоуровневую иерархическую структуру. В многоуровневых АС обработка информации распределена между устройствами, имеющими собственные вычислительные средства, что позволяет разнести в пространстве измерительную аппаратуру и ЭВМ, ускорить процесс обработки и упростить программное обеспечение ЭВМ.

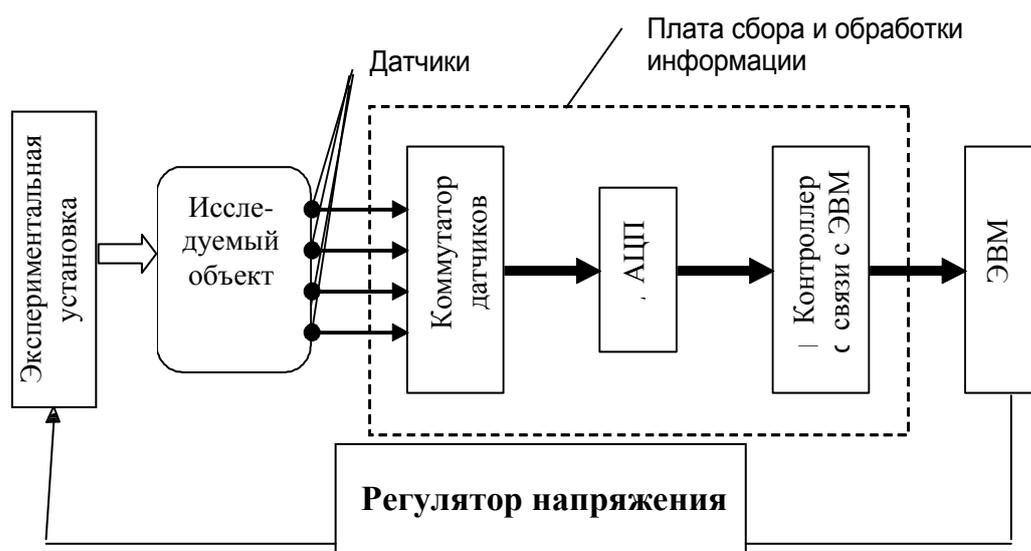


Рисунок 3.4– Принципиальная схема автоматизированного стенда

Все необходимые элементы для обработки информации, поступающей от датчиков, находятся непосредственно на плате, размещаемой внутри ЭВМ. Управление, прием и сохранение информации, поступающей от платы, осуществляется специальной программой – драйвером. Сохраненная информация может в дальнейшем быть использована для визуального представления и дальнейшей математической обработки с целью определения физических свойств исследуемого образца.

3.4. Автоматизированное оборудование для определения ТФХ керамических материалов.

В процессе последовательной реализации изложенных выше предложений было изготовлено два варианта автоматизированных стендов для исследования ТФХ керамических материалов методом одностороннего нагрева образцов [77,78].

В состав первого стенда входят лабораторная установка радиационного нагрева максимальной мощности 5 кВт, система сбора и обработки результатов измерений, система программируемого управления температурным режимом испытаний.

Система автоматизации эксперимента включает в себя измерительно-информационную систему СИИТ-3, интерфейсную плату связи с компьютером ЛА-48Д, ЭВМ на базе материнской платы АМД – 500, программное обеспечение для сбора, первичной обработки и представления результатов измерений в масштабе реального времени. Система управления режимом испытаний построена на применении программируемого регулятора Мини-Терм с термопарой типа ХА в системе обратной связи цепи управления. В качестве регулятора напряжения, подающегося на блок нагревателей, применён регулятор типа РНТО. Схема и общий вид стенда приведены на рисунках 3.5, 3.6.

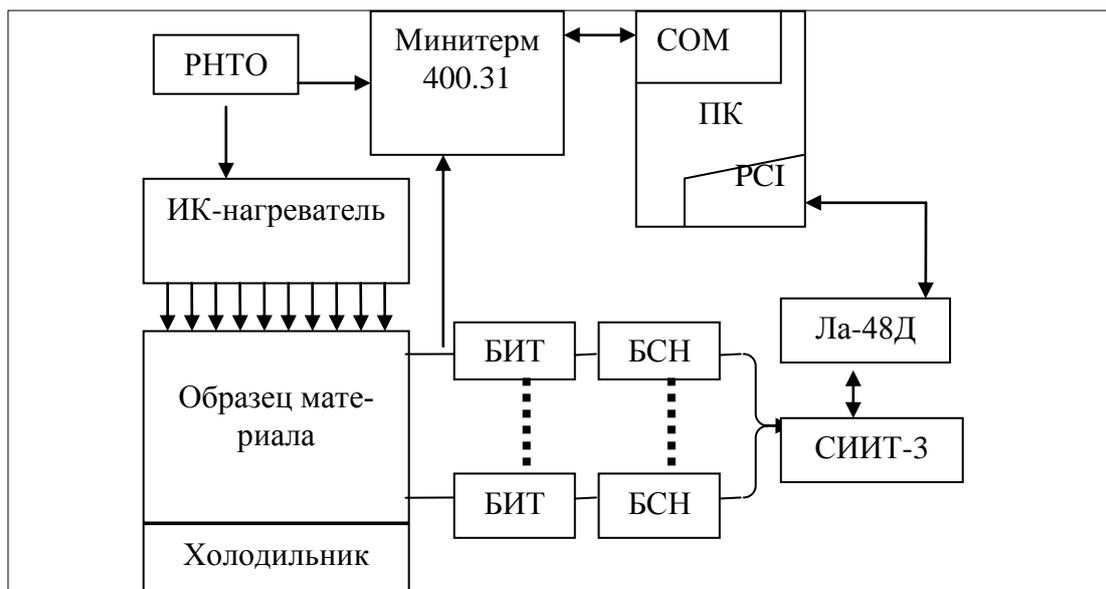


Рисунок 3.5– Структурная схема стенда одностороннего нагрева на базе СИИТ-3.

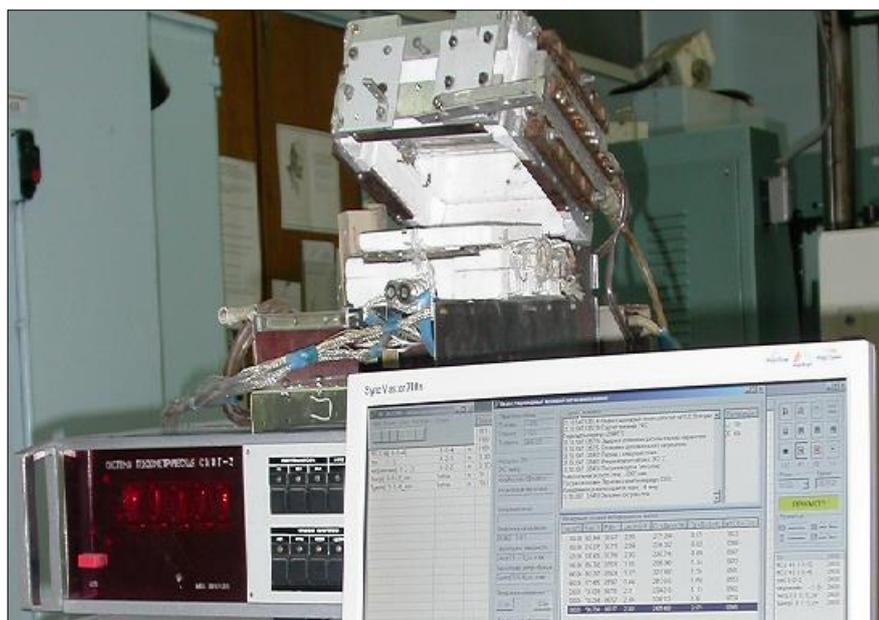


Рисунок 3.6– Общий вид автоматизированного стенда радиационного нагрева на базе СИИТ-3 и ПК «АТЛОН»

Стенд обеспечивает нагрев образцов из оксидной и нитрид кремниевой керамик в виде пластин размером $0,06 \cdot 0,06 \cdot 0,009$ м с темпом нагрева фрон-

тальной поверхности образца со скоростью до 15 К/с при теплоотводе с тыльной стороны близкому к естественной конвекции. Скорость опроса каналов измерения – 20 измерений/с. Количество каналов – 15. В ходе испытаний в графическом виде представляется информация о температурном состоянии образца.

Второй стенд является частью автоматизированного комплекса теплофизических исследований свойств материалов различными методами. В его состав для реализации определения ТФХ материалов способом одностороннего нагрева входят установка одностороннего нагрева УТРО–6М с вариантами одно и двух рядного расположения нагревателей, блок автоматизации сбора, измерения и первичной обработки выходных сигналов термопар и программирования режима испытаний образцов МИК–400.

Структурная схема комплекса представлена на рисунке 3.7

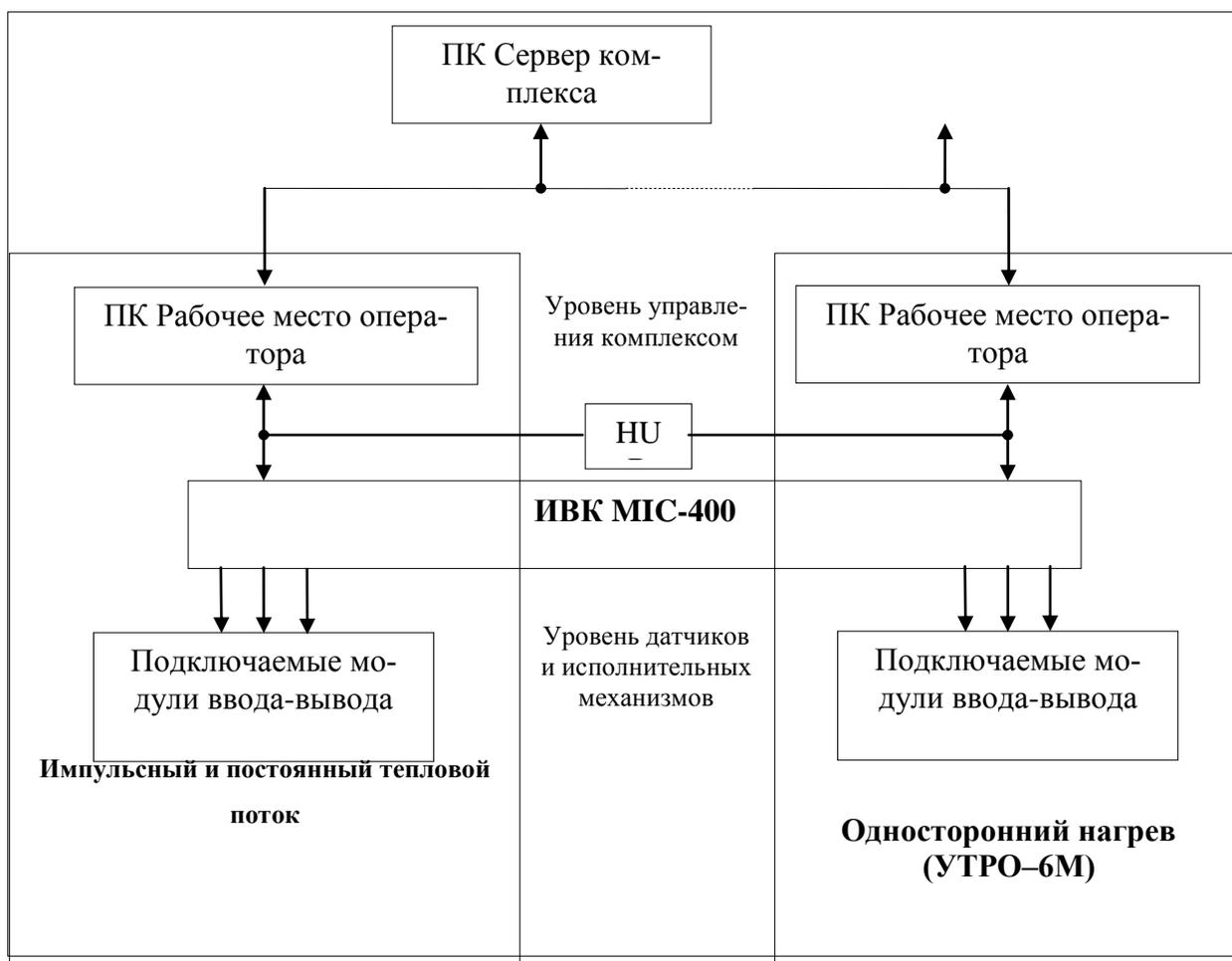


Рисунок 3.7– Блок-схема автоматизированного стенда определения теплофизических свойств материалов «РОТАН»

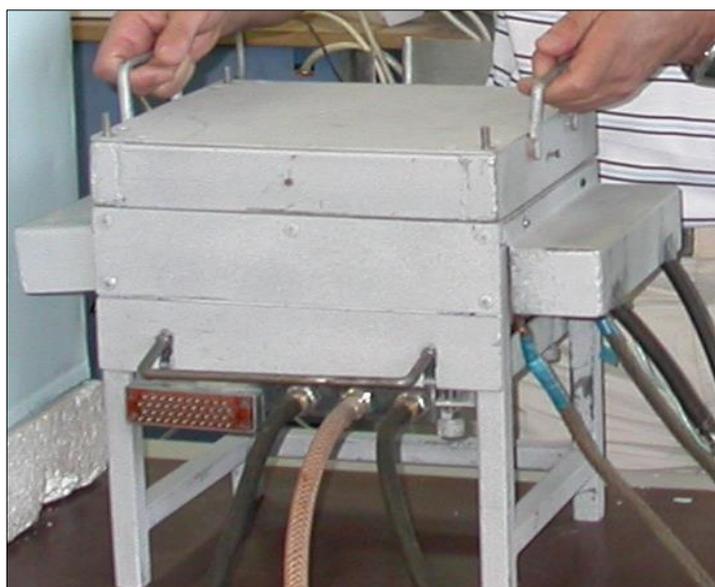


Рисунок 3. 8 – Общий вид установки УТРО-6М

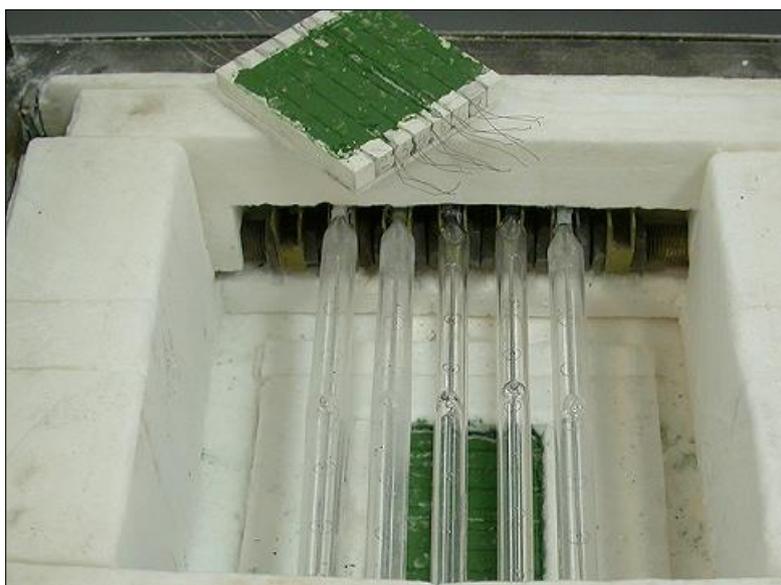


Рисунок 3. 9 – Рабочее пространство установки с однорядными нагревателями и подготовленный для монтажа образец исследуемого материала

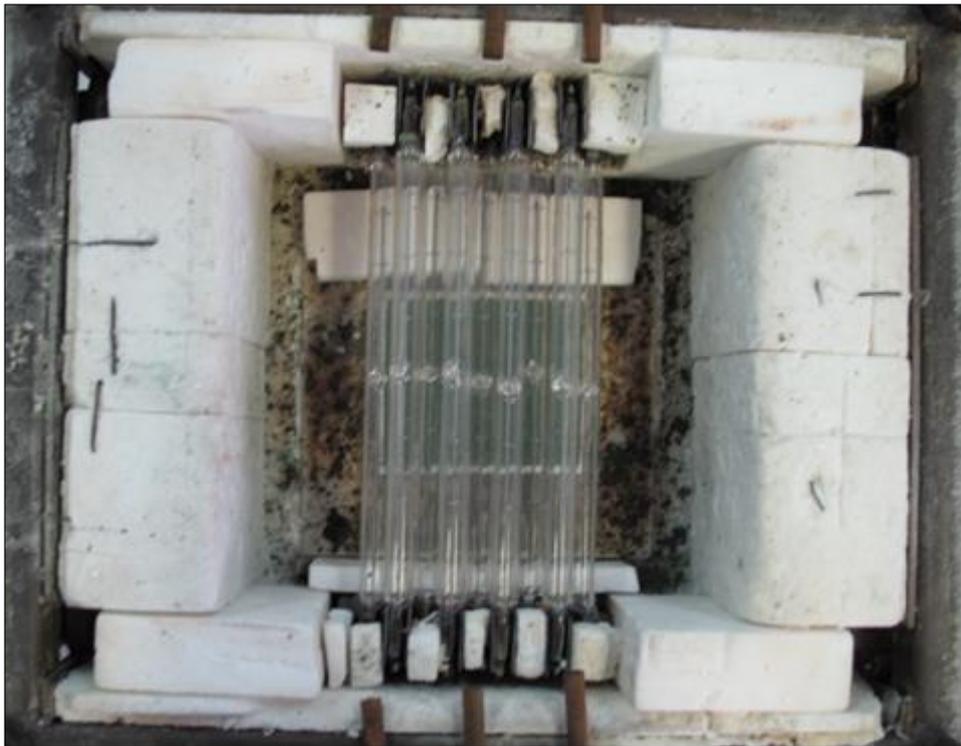


Рисунок 3.10 – Рабочее пространство установки с двухрядными нагревателями и системой воздушного охлаждения ламп

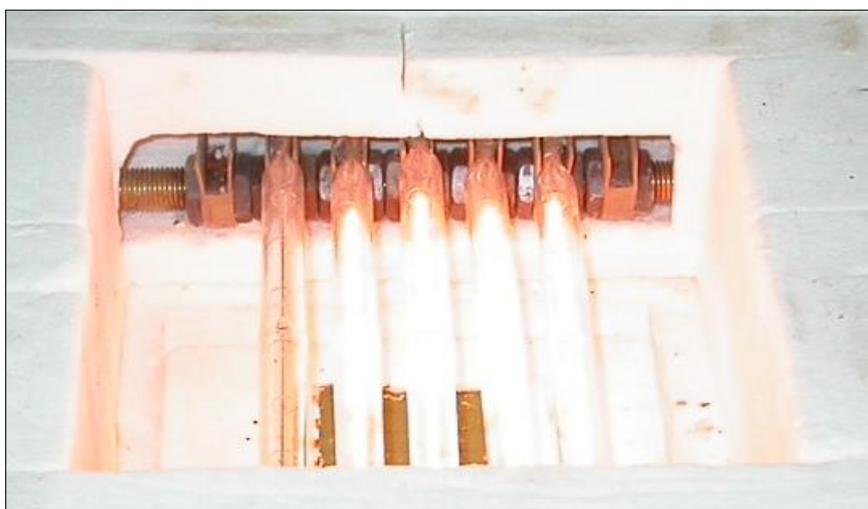


Рисунок 3.11– Рабочее пространство установки во время испытаний

Стенд обеспечивает нагрев образцов указанных выше размеров со скоростью до 100 К/с при 9 лампах в двухрядном нагревательном блоке и теплоизоляции тыльной поверхности. Частота опроса каналов измерения регулируется до величины 100 кГц.

Разработанное программное обеспечение позволяет автоматизировать все указанные выше этапы испытаний и, сформировав файл исходных данных для программы ICP–3, проводить определение ТФХ непосредственно на ЭВМ комплекса.

Порядок подготовки и проведения эксперимента по определению ТФХ керамических материалов включает следующие операции:

монтаж подготовленного для измерений образца исследуемого материала на холодильнике и сформированной таким образом сборки на поддон;

размещение поддона в камере испытательной установки;

подключение к установке системы водяного охлаждения и проверка ее герметичности;

подключение к установке измерительных и управляющих кабелей;

включение систем сбора информации и управления установкой и проверка качества соединений этих систем с первичными преобразователями;

включение системы охлаждения, системы силового питания нагревателей;

проведение испытаний по заранее подготовленному режиму нагрева образца;

отключение системы сбора и обработки информации;

отключение силового питания нагревателей;

отключение охлаждающей системы (через 30 минут);

извлечение поддона, демонтаж сборки.

3.5. Погрешность термодпары системы управления

При проведении различного вида тепловых испытаний изделий и их элементов важное значение имеет точное выполнение заданного температурного или теплового режима. Оно обеспечивается выбором типа, количества, способа размещения нагревателей и системы задания и управления их мощностью. В состав системы управления по линии обратной связи входит первичный преобразователь температуры или теплового потока. Его применяют

для оценки температурного или теплового состояния элемента конструкции и рассогласования между заданным и текущим значениями управляющего сигнала. В практике тепловых испытаний керамических конструкций режим ведут по температуре поверхности изделия, а в качестве первичных преобразователей применяют термопары ХА диаметром 0,2 мм. Их закрепляют или непосредственно на фронтальной поверхности изделия (образца) или в пазе этой поверхности с помощью термостойкого цемента. Практически по этой термопаре оценивают точность режима испытаний. Представляет интерес оценить влияние способа крепления этого датчика на точность ведения режима. Следует отметить, что экспериментальная оценка является достаточно сложной работой, а проведённые ранее исследования относились к проверке надежности (повторяемости) избранной технологии крепления термопары.

Предлагаемый подход к оценке погрешностей основан на сравнении температуры испытаний образца, задаваемой для управляющей термопары, с температурой его поверхностного слоя вне зоны влияния термопары (контрольные элементы) при равенстве тепловых потоков, падающих на эти участки поверхности, для каждого варианта установки первичного преобразователя.

Одним из способов оценки является математическое моделирование теплопереноса в образце (изделии) на основе решения двухмерной нелинейной задачи нестационарной теплопроводности.

В её решение положены следующие допущения:

поверхности всех тел – серые, их степень черноты и поглощательные способности зависят только от свойств материалов;

тела, участвующие в теплообмене, непрозрачны;

среда, окружающая тела, прозрачна для излучения;

нагреватели рассматриваются как источники, плотность падающего потока которых определяется их температурой;

режим испытаний ведётся по температуре управляющего элемента;

боковые и тыльная поверхности образца теплоизолированы.

Избранные для рассмотрения варианты крепления термопары в виде элементов расчётной схемы модели приведены на рисунке 3.12.

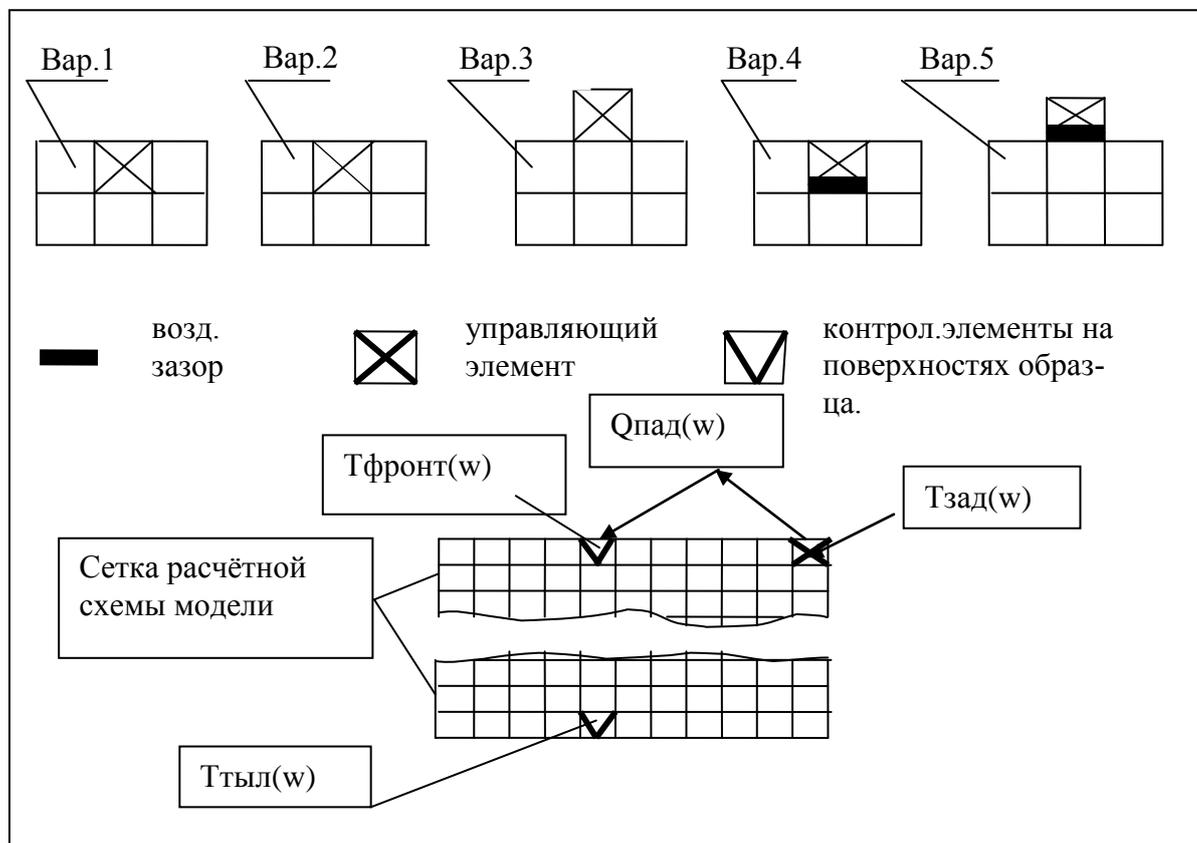


Рисунок 3.12– Варианты крепления термопары как управляющего элемента на сетке расчётной схемы:

вариант 1 – управляющий элемент – материал исследуемого образца – имеет плотный контакт с соседними элементами по боковым и тыльной поверхностям и является эталонным;

вариант 2 – управляющий элемент – термопара, условия контакта прежние;

вариант 3 – управляющий элемент – термопара, боковые поверхности открыты, на тыльной поверхности – плотный контакт;

вариант 4 – управляющий элемент – термопара, по боковым поверхностям – плотный контакт, по тыльной поверхности – воздушный зазор;

вариант 5 – управляющий элемент – термопара, боковые поверхности открыты, по тыльной поверхности – воздушный зазор.

Вариант 1 является контрольным для проверки правильности расчёта температур и потоков для исследуемого материала, т.е. проверки совпадения заданного и полученного значений температуры верхнего слоя образца в контрольные моменты времени. Полученные для него значения температур и необходимого для выполнения заданного режима теплового потока являются эталонными при сравнении результатов расчёта по другим вариантам.

Решение задачи РКТ численным методом состоит из последовательных решений трёх подзадач на каждом временном шаге расчётной схемы. Это – задача теплопроводности в управляющем режиме нагрева элементарном объёме для вычисления необходимой плотности теплового потока нагревателей, задача внешнего радиационного теплообмена в системе « источник – нагреваемая поверхность образца » для численного задания граничных условий на фронтальных поверхностях элементов модели и задача теплопроводности для описания теплообмена во внутренних элементах.

Алгоритм программы решения приведен на рисунке 3.13.

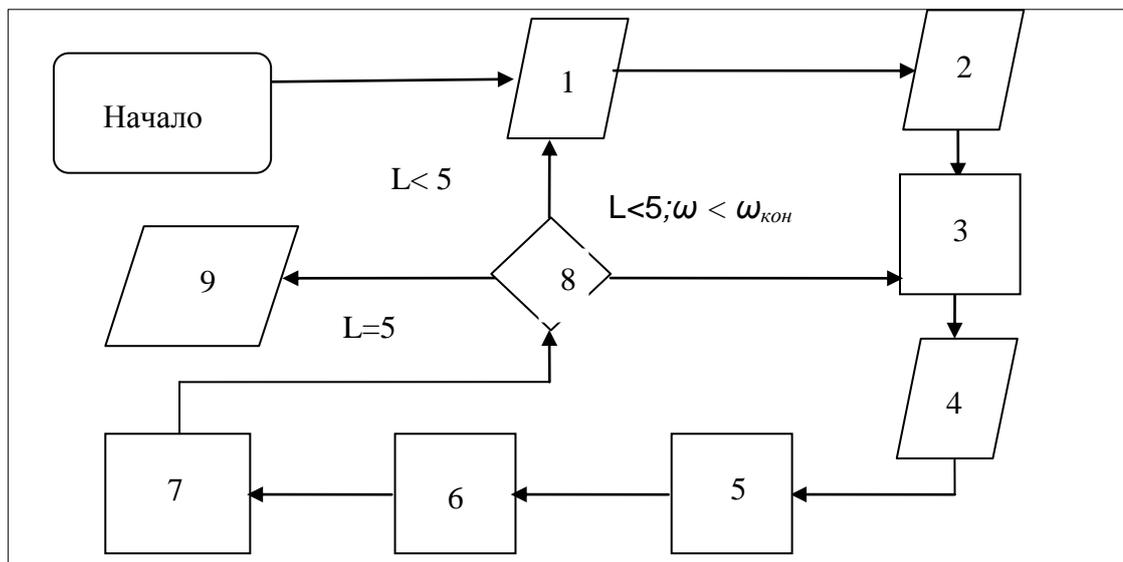


Рисунок 3.13– Схема алгоритма решения задачи:

1 – ввод данных, определяющих геометрию элементов модели и температурные зависимости ТФС используемых в модели материалов; 2 – ввод началь-

ных данных о температурах в элементах модели и на границах; 3 – вычисление значений ТФС каждого элемента модели; 4 – задание температуры управляющего элемента модели; 5 – вычисление температур в столбце управляющего элемента модели; 6 – вычисление необходимой для выполнения режима плотности теплового потока источника; 7 – вычисление температур в элементах модели; 9 – вывод на печать вычисленных значений температур контрольных элементов, плотностей падающего теплового потока источника в указанные значения временного шага ω_k ; L – номер варианта расчётной схемы.

Структурно программа выполнена в виде отдельных блоков:

блок задания граничных условий на фронтальной и тыльной сторонах модели;

блок задания начальных условий;

блок задания геометрических размеров и конфигурации модели;

блок ТФХ материалов модели;

блоки непосредственного расчета температурного и деформированного состояний элементов пакета;

блок вывода и представления полученных данных для последующей обработки.

Математическая модель даёт возможность, меняя ТФХ исследуемого образца, его толщину, параметры режима испытаний оценивать точность его выполнения.

Были выполнены оценочные расчёты для образцов материалов из кварцевой керамики и стеклокерамики. Температурный режим управляющего элемента и граничные условия на боковых и тыльной поверхностях образцов соответствовали условиям определения ТФХ. Расчётная модель представляла собой поперечное сечение пластины размером 7x3 мм по толщине и ширине. Результаты расчётов для указанных выше вариантов установки управляющего элемента в виде температур на поверхностях образца и плотности падающего от источника теплового потока приведены на рисунках 3.14 – 3.16 для образца из стеклокерамики и 3.17 – 3.19 для образца из кварцевой керамики.

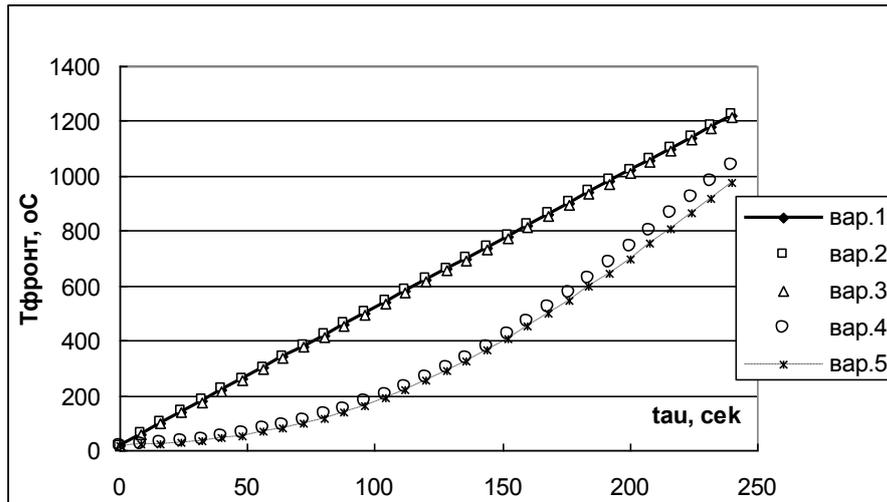


Рисунок 3.14 – Изменения температуры фронтального слоя образца из стеклокерамики в процессе нагрева

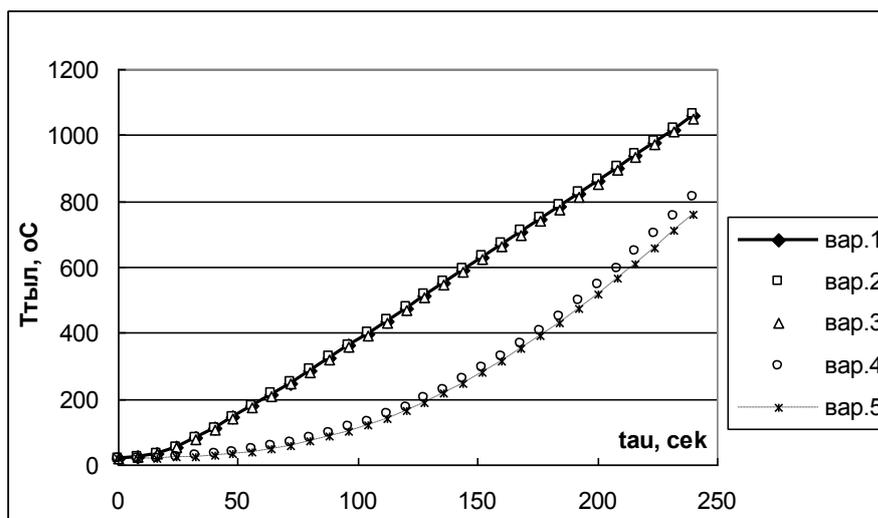


Рисунок 3.15 – Изменения температуры тыльного слоя образца из стеклокерамики в процессе нагрева

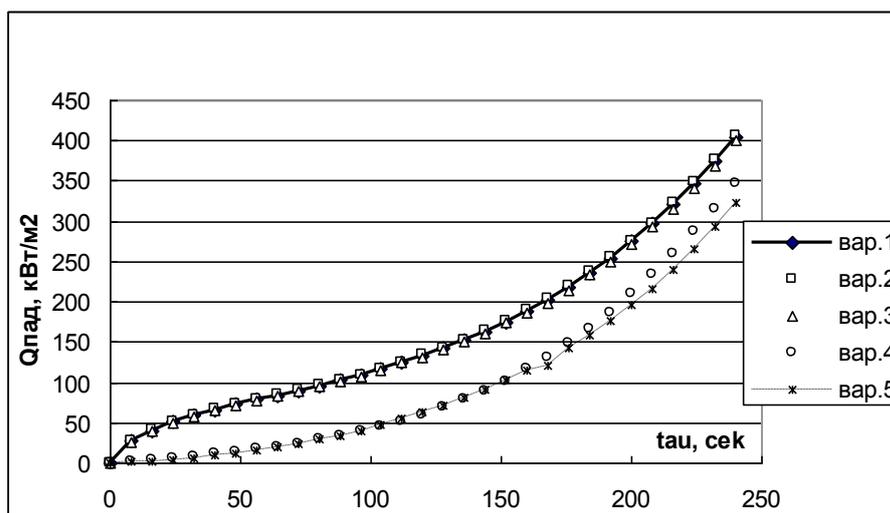


Рисунок 3.16– Изменения плотности падающего на образец из стеклокерамики теплового потока образца в процессе нагрева

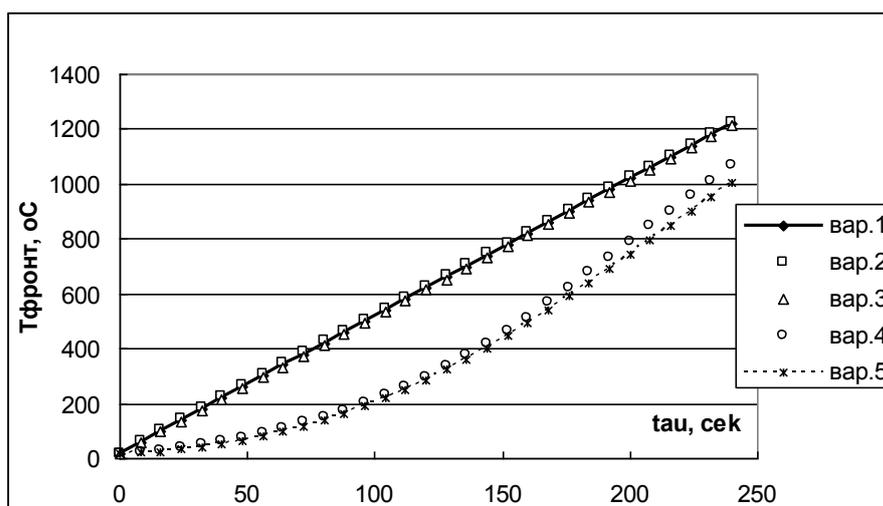


Рисунок 3.17 – Изменения температуры фронтального слоя образца из кварцевой керамики в процессе нагрева

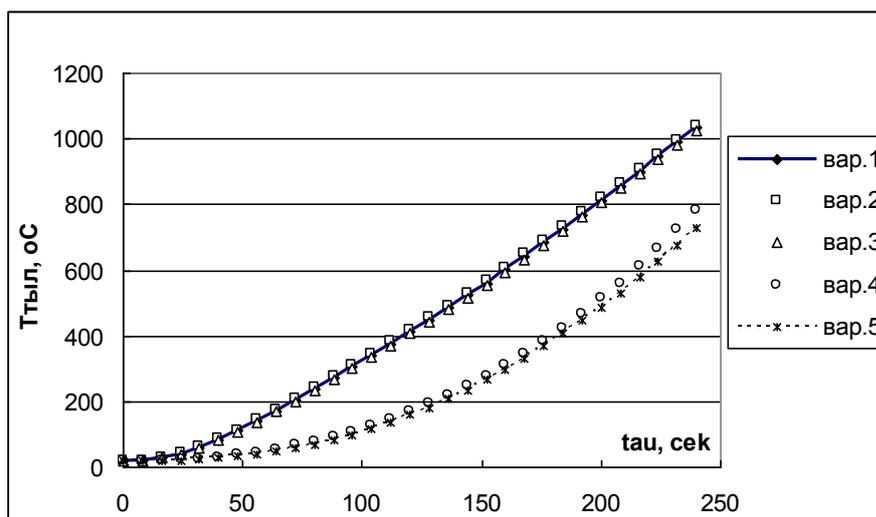


Рисунок 3.18 – Изменения температуры тыльного слоя образца из кварцевой керамики в процессе нагрева

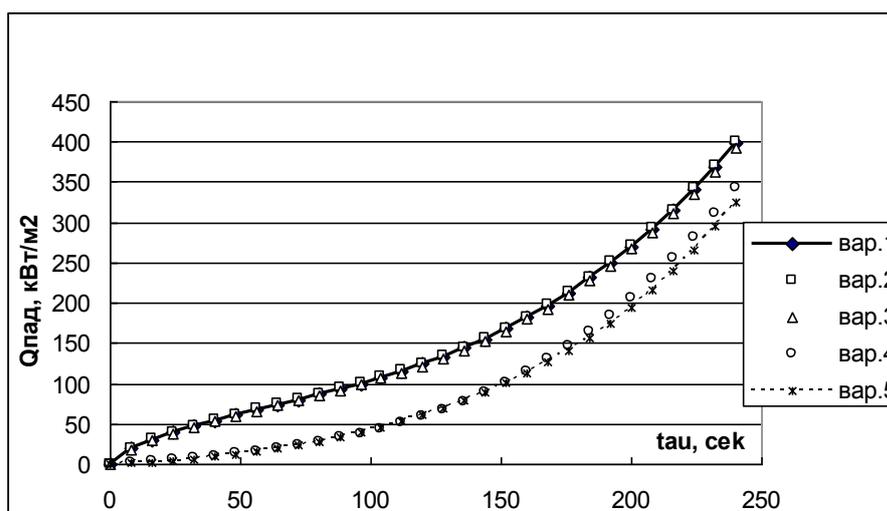


Рисунок 3.19 – Изменения плотности падающего на образец из кварцевой керамики теплового потока в процессе нагрева

Выполненные расчёты показали, что наименьшая погрешность ведения теплового режима достигается при обеспечении плотного контакта управляющей термопары с нагреваемой поверхностью (вариант 2,3) – отклонение не превышает 10 °С для обоих материалов. Установка управляющей термопары на поверхность нагрева с зазором между ними (вариант 4,5) приводит к уменьшению необходимой текущей мощности нагревателей по сравнению с

эталонным значением (вариант 1) до 20 %, что меняет характер теплообмена внутри образца и приводит к отклонениям от эталонных значений, достигающих 200 °С для фронтальной поверхности и 300 °С для тыльной. Следует отметить, что в процессе нагрева из-за значительной разницы (на порядок и более) между ТКЛР керамического образца и термопары даже при начальном плотном контакте между ними возможно образование воздушной прослойки, что приводит к искажению режима испытаний. Проведённый расчёт указывает на зависимость величины погрешности ведения режима от особенностей крепления термопары системы управления на исследуемый образец и ТФС исследуемого материала.

Экспериментальная проверка результатов расчёта была проведена на установке одностороннего нагрева и образце из кварцевой керамики с использованием устройства для измерения температуры поверхности объекта [80], реализующего экстраполяционную формулу Лагранжа. Устройство представляет собой стержень, изготовленный из исследуемого материала и являющийся одним из элементов составной пластины. В его боковые пазы на глубинах 0,5; 1,0; 1,5 мм от поверхности нагрева установлены ХА термопары диаметром 0,2 мм. Устройство в составе пластины расположено рядом с её элементами, во фронтальных пазах которых закреплены термопары системы управления в вариантах плотного контакта с дном паза и воздушной прослойкой между ними. Испытания проводили в два этапа. На первом этапе нагрев фронтальной поверхности образца со скоростью 5 град/с вели по термопаре управления, имеющей плотный контакт. На втором этапе в систему управления включили термопару с воздушной прослойкой и повторили режим нагрева. По показаниям термопар устройства в процессе нагревов вычисляли температуру поверхности образца. Расчёты показали близкое (в пределах 12 градусов) совпадение температур управляющей термопары и устройства на первом этапе за исключением начального участка нагрева. На втором этапе разница температур достигала 110 градусов в конце режима. В

обоих нагревах вычисленная температура поверхности образца была ниже температуры управляющей термопары.

При проведении испытаний по определению ТФХ управляющую термопару устанавливают в пазе образца (вариант 2) до положения плотного контакта с дном и боковыми стенками паза. После предварительного прижатия района горячего спая ко дну свободное пространство замазывают термостойким цементом пониженной вязкости на основе жидкого стекла и диоксида алюминия по всей длине паза за исключением 3 мм полосы около горячего спая с последующей сушкой до полного затвердевания состава. Таким способом обеспечивают плотный тепловой контакт термопары со стенками паза в процессе первого нагрева.

Выводы к главе

1. Сформулированы технические требования к автоматизированному оборудованию для определения ТФХ керамических материалов в условиях нестационарного одностороннего нагрева.

2. Предложены и проведены расчеты основных технических параметров установки.

3. Показано, что при проектировании установок, реализующих указанные выше требования, целесообразно применение трёхмерной модели нестационарного теплообмена, дающей более точное представление о тепловом состоянии элементов установок радиационного нестационарного нагрева по сравнению с вариантом расчёта по условиям стационарного теплообмена.

4. Изготовлены и испытаны по техническим условиям автоматизированные стенды лабораторного типа и автоматизированного комплекса. Полученные характеристики оборудования соответствуют заданным техническим заданием величинам.

5. Проведена оценка точности выполнения заданного режима испытаний для различных способов, крепления, термопары системы управления на объекте исследований и предложен вариант крепления, обеспечивающий наименьшую погрешность.

4. Постановка и результаты теплофизических исследований керамических материалов

4.1. Методика испытаний и обработки экспериментальных данных

Результатом проведённых исследований является методика, которая предназначена для определения величин коэффициентов теплопроводности керамических материалов на основе диоксида и нитрида кремния в диапазоне температур от 293 до 1500 К в условиях одностороннего нагрева [80].

Сущность реализованного метода заключается в нагреве с постоянной скоростью до заданной температуры фронтальной поверхности образца, измерении во время испытаний температур образца в заданных точках и вычислении значений коэффициента теплопроводности исследуемого материала по данным эксперимента с помощью программы решения КОЗТ.

Для испытаний применяют образец исследуемого материала в виде набора из восьми прямых стержней квадратного поперечного сечения размером 7·7·60 мм, собранными в прямоугольную пластину (см. рисунки 4.1, 4.2).

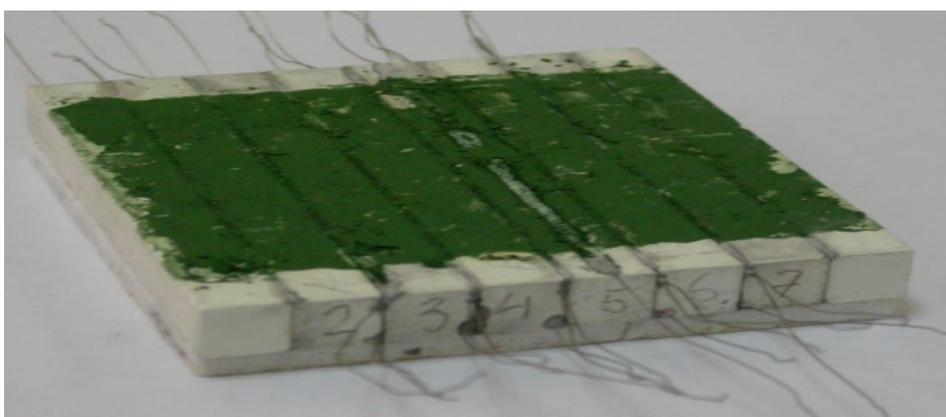


Рисунок 4.1 – Внешний вид подготовленного к эксперименту образца

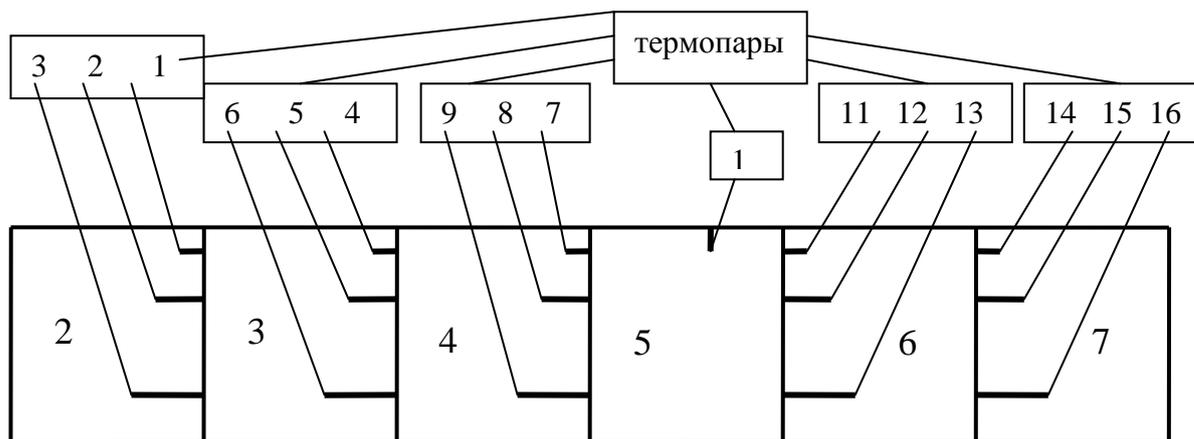


Рисунок 4.2– Схема укладки стержней в составной образец исследуемого материала, их нумерация и привязка термопар образца к каналам измерительного тракта испытательного комплекса

Подготовка составного образца к испытаниям включает в себя операции по нарезке горизонтальных пазов разной глубины в стержнях, изготовлению безкорольковых термопар, укладке термопар в пазы, сборке образцов в пластину, подключению термопар к схеме измерений на холодильнике установки, укладке на плиту холодильника теплоизоляции боковых поверхностей образца.

Затем холодильник устанавливают в рабочую зону установки одностороннего нагрева и выполняют операции по подключению к установке трактов водяного охлаждения нагревателей и холодильника, каналов измерения выходных сигналов термопар и управления режимом температурных испытаний.

После проверки правильности подготовительной работы проводят испытания по заданному режиму испытаний: темп нагрева фронтальной поверхности образца (5 град/с) и максимальная температура (определяется заданием). В ходе испытаний фиксируют показания термопар с заданной частотой опроса каналов измерения.

По окончании испытаний из показаний термопар каждого измерительного стержня образца формируют файлы исходных данных для ввода в про-

грамму определения ТФС материала ИСР-3. Полученные данные обрабатывают на основе статистико-вероятностной оценки результатов измерений.

4.2. Результаты определения коэффициентов теплопроводности исследуемой керамики

Изложенные выше рекомендации и разработанная методика были применены при проведении экспериментов по определению температурных зависимостей коэффициентов теплопроводности керамик на основе диоксида и нитрида кремния [71,73]. В качестве образца использовали набор стержней исследуемого материала прямоугольного поперечного сечения размером 7x7x60 мм, в которые на глубинах 0,6-0,9 мм; 1,4-1,8 мм; 2,5-2,8 мм; 6,0-6,5 мм были уложены в горизонтальных пазах вдоль боковых поверхностей по 3 термопары.

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

Результаты обработки экспериментальных данных по этим материалам приведены на рисунках 4.3 – 4.5.

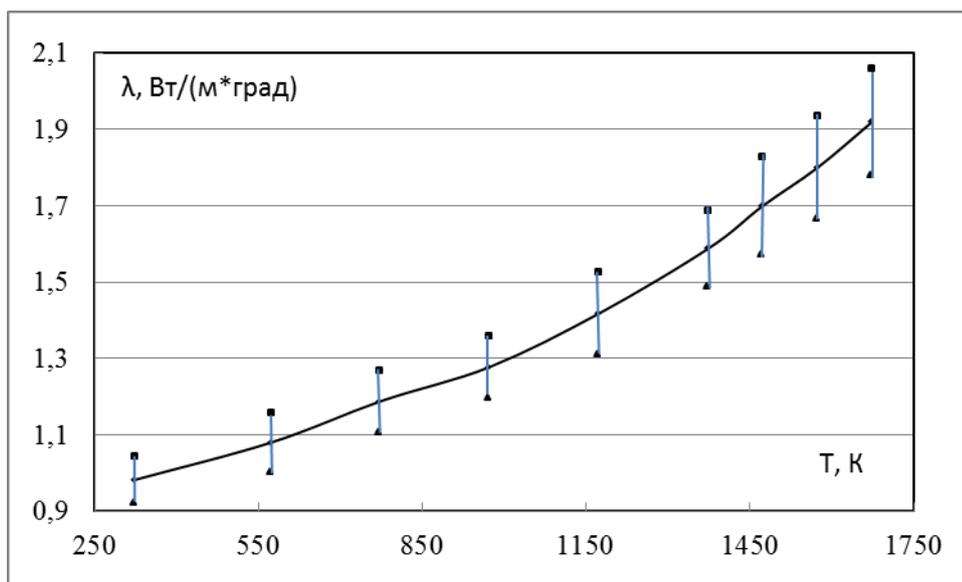


Рисунок 4.3– Экспериментальные температурные зависимости коэффициента теплопроводности образцов из кварцевой керамики

Проведённые расчёты коэффициентов теплопроводности образцов из кварцевой керамики показали, что приведённая погрешность эксперимента ϵ_λ составляет 10%, методическая составляющая приведенной погрешности ϵ_m не превышает 6%, случайная составляющая $\epsilon_{сл}$ равна 8%.

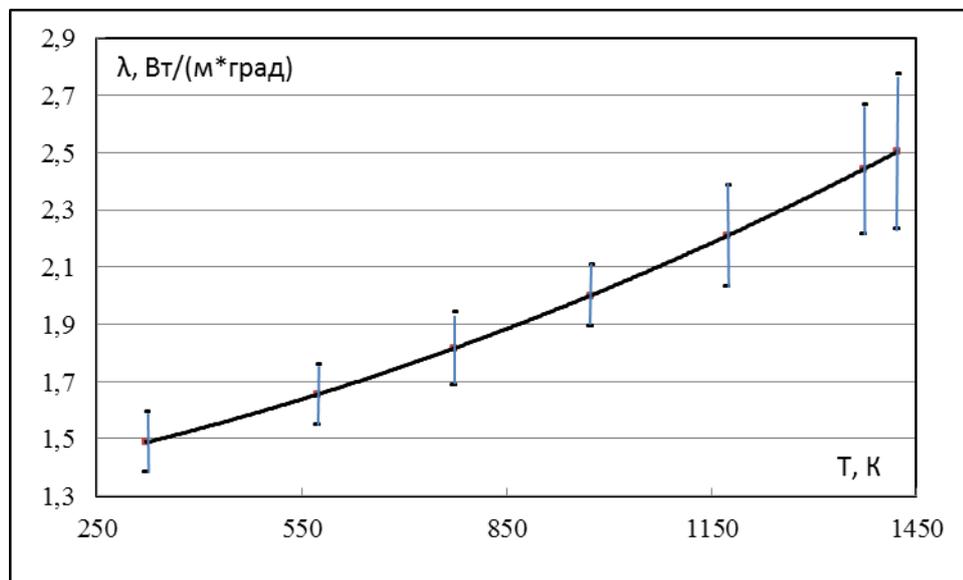


Рисунок 4.4. Экспериментальные зависимости коэффициента теплопроводности образцов из стеклокерамики от температуры

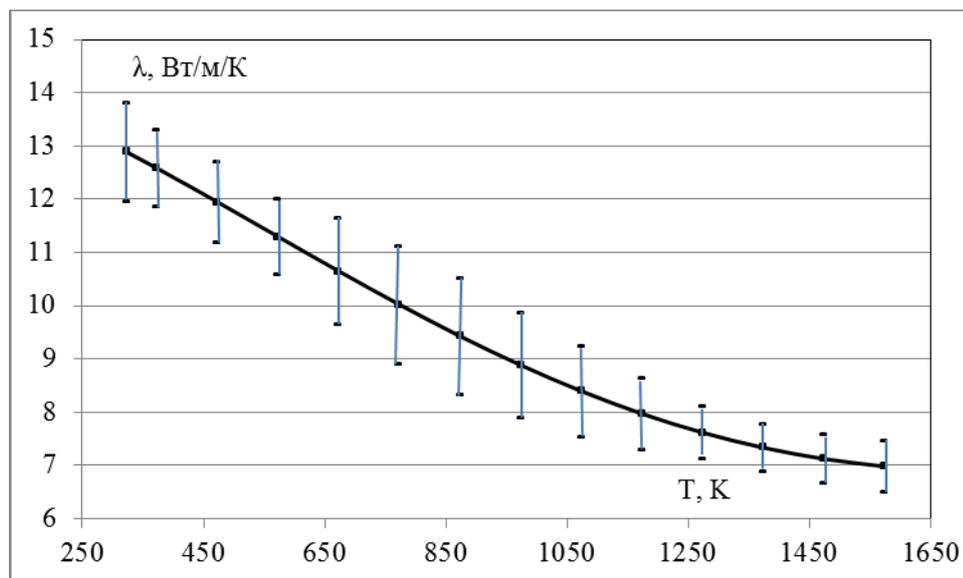
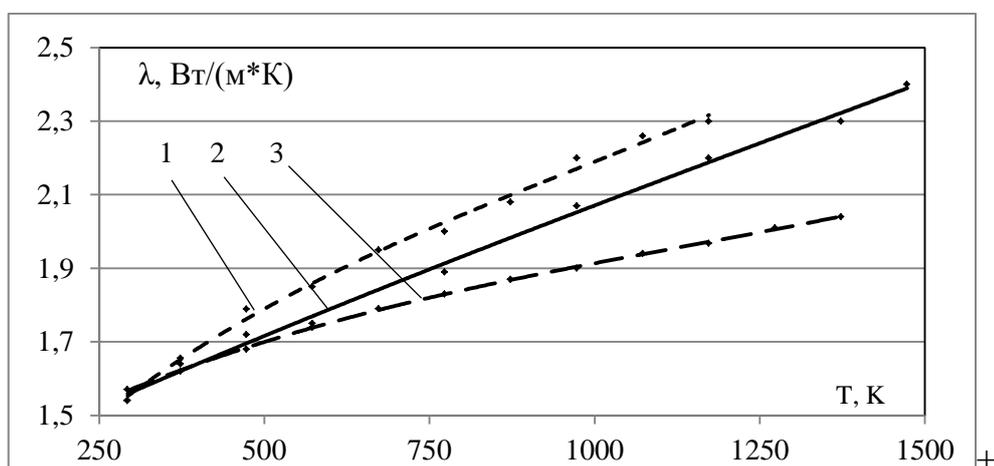


Рисунок 4.5. Экспериментальные зависимости коэффициента теплопроводности образцов нитрид – кремниевой керамики от температуры

Выполненные согласно методике расчёты показали, что приведённая погрешность эксперимента ϵ_λ для стеклокерамического образца составляет 11%. Методическая составляющая погрешности ϵ_m близка к 7%, случайная составляющая $\epsilon_{сл}$ равна 8,5%.

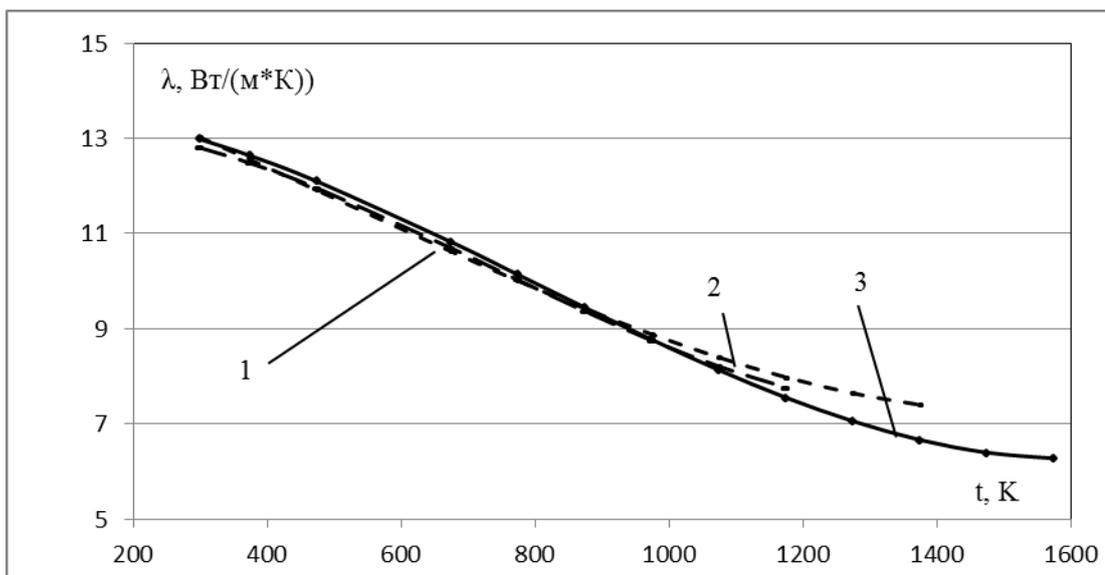
Для керамики из нитрида кремния ϵ_λ равна 11 %, ϵ_m близка к 6 %, $\epsilon_{сл}$ составляет 9,1 %.

Сравнение результатов определения эффективного коэффициента теплопроводности исследуемых материалов разработанным методом с другими методами, применяемыми в практике теплофизических исследований керамических материалов [82,83], приведены на рисунках 4.6 – 4.8.



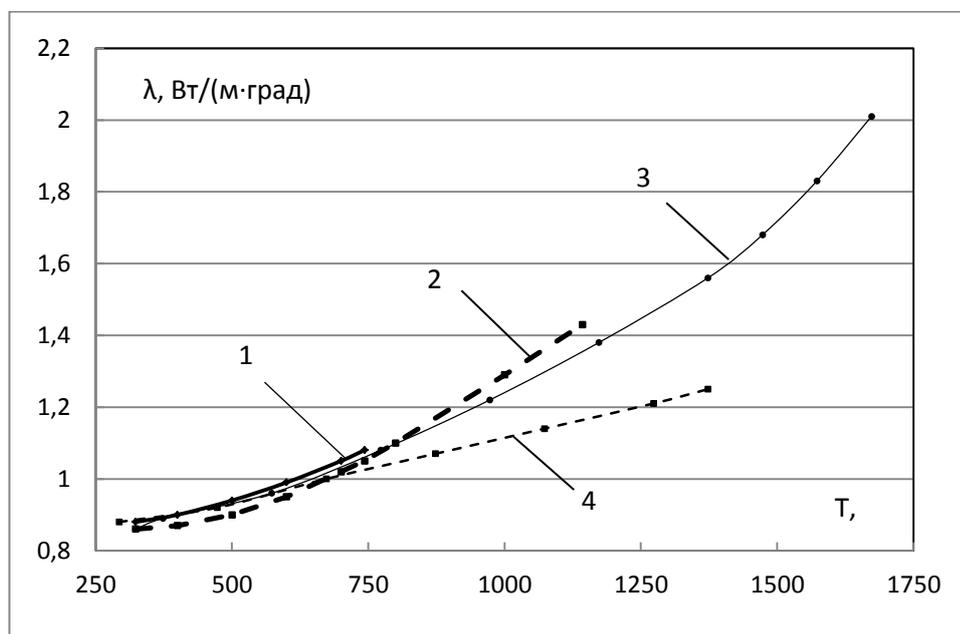
1 – квазистационарный метод; 2 – метод одностороннего нагрева;
3 – метод лазерной вспышки

Рисунок 4.6. Сравнительные температурные зависимости коэффициента теплопроводности стеклокерамики, определённые разными методами



1 – метод лазерной вспышки; 2 – квазистационарный метод; 3 – метод одностороннего нагрева

Рисунок 4.7 – Температурные зависимости коэффициента теплопроводности нитрид – кремниевой керамики



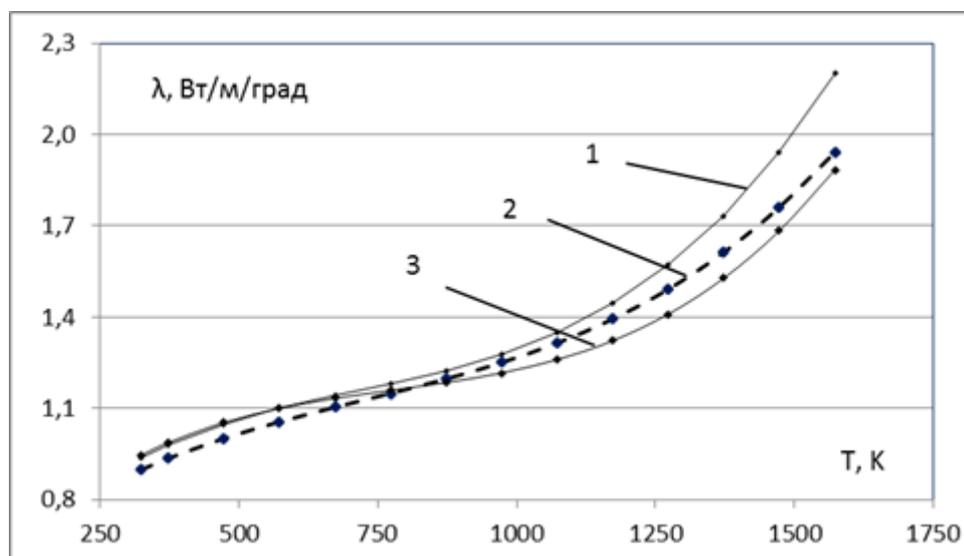
1 – импульсный метод; 2 – квазистационарный метод;
3 – метод одностороннего нагрева; 4 – метод лазерной вспышки

Рисунок 4.8. Сравнительные температурные зависимости коэффициента теплопроводности кварцевой керамики

Сравнительный анализ результатов, показанных на рисунке 4.7, позволяет сделать вывод о совпадении результатов определения теплопроводности обоими методами в пределах 11% приведенной погрешности, которая не превышает точности разработанного метода.

Приведённые на рисунке 4.8. результаты показали, что до 800 К данные, полученные всеми методами, совпадают. В области более высоких температур величины коэффициента теплопроводности, рассчитанные по методике одностороннего нагрева, имеют меньшие по сравнению с методом квазистационарным исследования значения. Хотя разность полученных результатов увеличивается с ростом температуры исследований, но она не превышает достигнутой погрешности разработанного метода. Различие результатов в области высоких температур можно объяснить увеличением вклада радиационной составляющей теплопереноса в величину эффективной теплопроводности кварцевой керамики, которую можно рассматривать как полупрозрачный по оптическим свойствам материал, и тем, что применяемые в эксперименте термопары являются оптически непрозрачными элементами [82-85]. Они завышают действительную температуру образца в точках измерения. И рассчитанные по программе ICP-3 значения коэффициента теплопроводности относятся к более высоким температурам по сравнению с действительными величинами образца. В условиях квазистационарного нагрева разница измеренной и действительной температур образца незначительна. Вклад радиационной составляющей теплопроводности зависит от температурных зависимостей оптических свойств исследуемого материала. Эти предположения подтверждают приведённые на рисунке 4.9. результаты определения эффективного коэффициента теплопроводности материала близкого по теплофизическим и оптическим свойствам к кварцевой керамике при моделировании метода одностороннего нагрева образца без термопар и с учётом их влияния. Исходные для расчёта теплопроводности значения температур были получены на математических моделях решения прямых двухмерных задач нестаци-

онарной теплопроводности и радиационно–кондуктивного теплопереноса [24].



1 – данные, рассчитанные по модели радиационно–кондуктивного теплообмена в образце без термопар;

2 – данные, рассчитанные по модели нестационарной теплопроводности;

3 – данные, рассчитанные по модели радиационно–кондуктивного теплопереноса в образце с термопарами

Рисунок 4.9 – Температурные значения коэффициента теплопроводности частично прозрачного материала в зависимости от применяемой модели теплообмена

Полученные результаты подтверждают возможность применения результатов решения прямой задачи нестационарной теплопроводности в непрозрачных материалах при моделировании теплообмена в условиях одностороннего нагрева образца к определению этой характеристики материала. Расчёты эффективной теплопроводности, полученные на модели радиационно–кондуктивного теплопереноса, показывают увеличение с ростом температуры исследования различия значений этой характеристики в связи с возрастающим вкладом радиационной составляющей в этот параметр и

влиянием термопар на теплообмен в образце. При этом разница результатов моделирования не превышает приведённой погрешности эксперимента, что делает допустимой применение моделей нестационарной теплопроводности к прогнозированию теплопереноса в материалах близких по теплофизическим и оптическим свойствам к кварцевой керамике.

Выводы к главе

1. Разработана методика определения коэффициента теплопроводности конструкционных керамических материалов в диапазоне температур 293 – 1500 К в условиях одностороннего лучистого нагрева образцов материала.
2. Проведены исследования по определению коэффициентов теплопроводности образцов керамик на основе диоксида и нитрида кремния методом одностороннего нагрева, которые показали, что в области применяемых режимов испытаний определение этой характеристики материала можно проводить без введения поправок на выходные сигналы измерительных термопар.
3. Приведённые погрешности определения коэффициентов теплопроводности образцов из кварцевой керамики, стеклокерамики и керамики на основе нитрида кремния не превышают 11 % во всех диапазонах температурных измерений.
4. Результаты проведённых сравнительных экспериментальных исследований коэффициента теплопроводности кварцевой керамики, стеклокерамики и нитрида кремния квазистационарным методом и методом лазерной вспышки совпадают с результатами, полученными методом одностороннего нагрева, в пределах 11% приведённой погрешности эксперимента.
5. Различие в расчётах коэффициента теплопроводности частично прозрачного материала типа кварцевой керамики, выполненных применяемой в исследованиях программой ICP-3 по результатам моделирования нестационарной теплопроводности и радиационно – кондуктивного теплообмена, не превышают 11% погрешности эксперимента, что подтверждает применимость разработанной методики к исследованиям материалов такого вида.

Заключение

Создание перспективных образцов авиационной и ракетной техники невозможно представить без достоверных данных по характеристикам конструкционных и теплозащитных материалов в широком диапазоне эксплуатационных нагрузок. Так, отсутствие достоверных данных по теплопроводности керамики может стать причиной нарушения теплового режима бортового оборудования, находящегося под радиопрозрачным обтекателем. Вместе с тем, как показали предварительные исследования, коэффициент теплопроводности ряда керамик, может зависеть не только от температуры, но и от темпов нагрева экспериментальных образцов. Детально исследовать закономерности изменения теплопроводности керамических материалов при высокотемпературном и одновременно высокоскоростном нагреве, характерном для условий полета, до недавнего времени не представлялось возможным из-за ограниченных возможностей стандартизованного оборудования.

Таким образом, отправными пунктами к постановке настоящей работы явились противоречивость и узость имевшейся информации по теплопроводности ряда перспективных марок оксидной и нитридной керамики, ограниченные возможности традиционных методов и средств теплофизического эксперимента. Благодаря совместному использованию методов математического и физического моделирования, методов решения обратных задач и статистического анализа, внедрению в теплофизический эксперимент компьютеризированных средств управления, обработки и анализа данных в диссертации получены следующие результаты:

1. Впервые при исследовании теплопроводности керамических материалов обоснован подход к оптимизации теплофизического эксперимента по последовательно применяемым критериям на условиях минимизации затрат.
2. Разработан комплекс математических моделей теплообмена в керамических конструкционных материалах для оптимизации теплофизического эксперимента по форме и размерам образцов исследуемых материалов, режимам

их испытаний, конструкции установки радиационного нагрева

3. Предложен новый подход к расчёту погрешности определения теплопроводности материалов по статистико-вероятностным критериям оценки.

4. Разработана методика определения теплопроводности керамических материалов в широком диапазоне температур и скоростей нагрева и получены новые расчетно-экспериментальные данные по коэффициентам теплопроводности керамики на основе диоксида кремния и нитрида кремния марок НИАСИТ-8ПП, ОТМ-357, ОТМ-904 при температурах до 1500 К, с погрешностью, не превышающей 7%.

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

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

По материалам диссертации опубликовано 14 научных работ в виде статей, в том числе 2 в журналах ВАК, и тезисов докладов в научно-технических журналах и сборниках, сделано 9 докладов на научных симпозиумах и конференциях в 2004-2014 г.г.

Список использованных источников

1. Проектирование головных обтекателей ракет из керамических и композиционных материалов: учебное пособие / М.Ю. Русин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 64 с.
2. Алифанов, О.М. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем: учебное пособие / О.М. Алифанов, П.Н. Вабищевич, В.В. Михайлов и др. – М.: Логос, 2001. – 400 с.: ил.
3. Пивинский, Ю.Е. Кварцевая керамика / Ю.Е. Пивинский, А.Г. Ромашин. – М.: Металлургия, 1974. – 264 с.
4. Суздальцев, Е.И. Синтез высокотермостойких стеклокерамических материалов и разработка технологии изготовления на их основе обтекателей летательных аппаратов: Дис... д-ра техн. наук:05.17.11 / Суздальцев Евгений Иванович. – М., 2001. – 431 с.
5. Павлушкин, Н.М. Основы технологии ситаллов / Н.М. Павлушкин. – М.: Стройиздат, 1970. – 351 с.
6. Литовский, Е.Я. Теплофизические свойства огнеупоров: справочник / Е.Я. Литовский, Н.А. Пучкелевич. – М.: Металлургия, 1982. – 152 с.
7. Шашков, А.П. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А.П. Шашков, Г.М. Волоков, Т.Н. Абраненко [и др.]; под общ. ред. А.В. Лыкова. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.
8. Осипова, В.А. Экспериментальные исследования процессов теплообмена / В.А. Осипова. – М.: Энергия, 1982. – 152 с.
9. Коротков, П.А. Динамические контактные измерения тепловых величин / П.А. Коротков, Г.Е. Лондон. – Л.: Машиностроение, 1974. – 224 с.
10. Бойко, Н.В. Некоторые вопросы экспериментального исследования теплопроводности материала при высоких температурах / Н.В. Бойко, Э.Э. Шпильрайн // Теплофизика Высоких Температур, 1964. – Т.2. №4. – С. 549–557.

11. Платунов, Е.С. Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов, С.Е. Буравой [и др.]– Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
12. Филиппов, Л.П. Измерение теплофизических свойств методом периодического нагрева / Л.П. Филиппов.– М.: Атомэнергоиздат, 1984. – 105 с.
13. Темкин, Ф.Г. Обратные задачи теплопроводности / Ф.Г. Темкин. – М.–Л.: Энергия, 1973. – 464 с.
14. Алифанов, О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов / О.М. Алифанов. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
15. Алифанов, О.М. Алгоритмы диагностики тепловых нагрузок летательных аппаратов / О.М. Алифанов, В.К. Занцев, Б.М. Панкратов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1983. – 168 с.
16. Алифанов, О.М. Выбор приближенного решения обратной задачи теплопроводности / О.М. Алифанов, И.Е. Балашова. // Инженерно-Физический Журнал. – 1985. – Т. 48. №5. – С. 851–860.
17. Коздоба, Л.А. Классификация задач и методов оптимизации тепловых процессов / Л.А. Коздоба. // Промышленная теплотехника. – 1987. – Т.9. №2. – С. 52–62.
18. Алифанов, О.М. Обратные задачи теплообмена / О.М. Алифанов. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
19. Алифанов, О.М. Экстремальные методы решения некорректных задач / О.М. Алифанов, Е.А. Артюхин, С.В. Румянцев. – М.: Наука, 1988. – 288 с.
20. Артюхин, Е.А. Определение коэффициента температуропроводности по данным эксперимента / Е.А. Артюхин. // Инженерно-Физический Журнал. – 1975. – Т.29. №1. – С.87–90.

21. Исаев, К.Б. Теплофизические характеристики материалов в широком диапазоне температур и скоростей нагрева / К.Б. Исаев. – К.: Куприянова, 2008. – 240 с.
22. Бек, Дж. Некорректные обратные задачи теплопроводности / Дж. Бек, Б. Блэкуэлл, Ч. Сент-Клэр мл. – М.: Мир, 1989. – 312 с.
23. Денисов, А.М. Введение в теорию обратных задач / А.М. Денисов. – М.: МГУ, 1994. – 208 с.
24. Резник, С.В. Математико-алгоритмическое и программное обеспечение исследования процессов радиационно-кондуктивного теплообмена / С.В. Резник, П.В. Просунцов, А.М. Михалёв и др. // Передовые термические технологии и материалы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – Ч.2 – С. 40–49.
25. Химмельблау. Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау.– М.: Мир, 1975. – 534 с.
26. Де Бор, К. Практическое руководство по сплайнам / К. Де Бор. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с.
27. Власов, В.В. Теплофизические измерения: справочное пособие по методам расчета полей, характеристик тепломассопереноса и автоматизации измерений / В.В. Власов, Ю.С. Шаталов, Е.Н. Зотов [и др.]. – Тамбов: Изд-во ВНИИРТМАШ, 1975. – 256 с.
28. Власов, В.В. Определение теплофизических свойств двухфазных систем на основе интегральных характеристик / В.В. Власов, Н.П. Федоров, Ю.С. Шаталов. // Инженерно-Физический Журнал.– 1978.– Т.35, №2. – С. 369.
29. Власов, В.В. Об оптимизации эксперимента по определению теплофизических свойств материалов методом интегральных характеристик / Власов В.В., Шаталов Ю.С., Федоров Н.П.// Теплофизика и теплотехника.– 1979. – Вып. 36. – С. 49–53.
30. Власов, В.В. Автоматическая установка для измерения теплофизических свойств в области фазовых переходов / В.В. Власов, Н.П. Пучков,

- Н.П. Федоров [и др.]. // Промышленная теплотехника. – 1981. – Т.3, №1. – С. 108–112.
31. Золотухин, А.А. Электронное обеспечение импульсных измерений коэффициента температуропроводности / А.А. Золотухин, В.Э. Пелецкий. // Промышленная теплотехника.– 1981. – Т.3. №1. – С. 79–84.
32. Mehling H., Hautzinger G., Nilsson O., Fricke J., Hofmann R. and Hahn O. Thermal Diffusivity of Semitransparent Materials Determined by the Laser-Flash Method Applying a New Analytical Model // International Journal of Thermophysics. V.19. 1998. P.941-949.
33. Построение ИИС на основе ИВК МІС: руководство программиста – Королёв: ООО "Научно-производственное предприятие "Мера", 2004. – 67 с.
34. Семенов, А.А. Определение теплофизических коэффициентов материалов при квазистационарном тепловом состоянии / А.А. Семенов. // Сб. ст.: Труды Ростовского инженерно-строительного института. – Ростов, 1955. – Вып.4. – С. 151–174.
35. Абрайтис, Р.Й. Исследование теплопроводности конструкционных керамических материалов / Р.Й. Абрайтис, А.К. Даргис, А.А. Русяцкас и др. // Огнеупоры и техническая керамика. – 1999. – №8. – С. 22–29.
36. Абрайтис, Р.Й. Исследование теплопроводности конструкционных керамических материалов / Р.Й. Абрайтис, А.К. Даргис, А.А. Русяцкас и др. // Огнеупоры и техническая керамика. – 2000. – №2. – С. 33–43.
37. Абрайтис, Р.Й. Исследование теплопроводности конструкционных керамических материалов / Р.Й. Абрайтис, А.К. Даргис, А.А. Русяцкас. и др. // Огнеупоры и техническая керамика. – 2000. – №4. – С. 39–42.
38. Абрайтис, Р.Й. Исследование теплопроводности конструкционных керамических материалов / Р.Й. Абрайтис, А.К. Даргис, А.А. Русяцкас. и др. // Огнеупоры и техническая керамика. – 2000. – №6. – С. 48–50.

39. Абрайтис, Р.Й. Исследование теплопроводности конструкционных керамических материалов / Р.Й Абрайтис, А.К. Даргис, А.А. Русяцкас и др. // Огнеупоры и техническая керамика. – 2000. – №12. – С. 41–46.
40. Абрайтис, Р.Й. Исследование теплопроводности конструкционных керамических материалов / Р.Й Абрайтис, А.К. Даргис, А.А. Русяцкас и др. // Огнеупоры и техническая керамика. – 2001.– №5. – С. 31–36.
41. Абрайтис, Р.Й. Исследование теплопроводности конструкционных керамических материалов / Р.Й Абрайтис, А.К. Даргис, А.А. Русяцкас. и др. // Огнеупоры и техническая керамика. – 2001. – №9. – С. 47–50.
42. Баранов, А.Н. Статические испытания на прочность сверхзвуковых самолетов / А.Н Баранов, Л.Г. Белозеров, Ю.С. Ильин и др. – М.: Машиностроение, 1974. – 389 с.
43. Пасконов, В.М Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В.М. Пасконов, И.И. Полежаев, Л.А. Чудов. – М.: Наука, 1984. –288 с.
44. Арутюнов, В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: учебник для вузов / В.А. Арутюнов, В.В Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Metallurgy, 1990. – 239 с.
45. Данишевский, А.К. Высокотемпературные термодпары / А.К. Данишевский, Н.И. Сведе-Швец. – М.: Metallurgy, 1973. – 230 с.
46. Бычковский, Р.В. Приборы для измерения температуры контактным способом / Р.В. Бычковский, Б.Н. Вигдорович, Е.А. Колесник [и др.]. – Львов: Вища школа, 1978. – 208 с.
47. Температурные измерения: справочное пособие / О.А. Геращенко, А.И. Гордов, А.К. Еремин [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1989. – 704 с.
48. Михалёв, А.М. Определение методической погрешности термодпарных измерений в частично прозрачных рассеивающих материалах при нестационарном нагреве / Михалёв А.М., Резник С.В. // Изв. Вузов. Машиностроение.– 1988. – №2. – С. 63–67.

49. Определение методической погрешности термопарных измерений в частично прозрачных рассеивающих материалах при нестационарном нагреве / А.М. Михалёв, С.В. Резник. // Изв. Вузов. Машиностроение. – 1988. – №4. – С. 55–59.
50. Ярышев, Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры / Н.А. Ярышев. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
51. Гордов, А.Н. Точность контактных методов измерения температуры / А.Н. Гордов, Я.В. Малков, Н.Н. Эргерт, Н.А. Ярышев. – Л.: Энергия, 1976. – 285 с.
52. Кулаков, М.В. Измерение температуры поверхности твердых тел / М.В. Кулаков, В.И. Макаров. – М.: Энергия, 1979. – 96 с.
53. Попов, В.Н. Об искажении температурного поля в области заделки термопары / В.Н. Попов. // Теплофизика Высоких Температур. – 1966. – Т.4. №2. – С. 261–266.
54. Бек, Дж. Искажающее влияние термопары на температурное поле в материалах с низкой теплопроводностью / Дж. Бек. // Теплопередача. – 1961. – Т.83. №4. – С. 143–148.
55. Безрукова, Е.Н. Влияние потерь тепла по термопаре на измерение температуры в твердых телах / Е.Н. Безрукова, О.А. Сергеев, Д.А. Татаршвили. // Сб. ст.: Исследования в области тепловых измерений. Тр. Метрологич. Ин-тов СССР / ВНИИМ, № 129(189). – М.– Л., 1971. – С. 192–197.
56. Сингх, Ошибки температурных измерений вследствие стока тепла от чувствительной части датчика по подводящим проводам / Сингх, Дайбс // Теплопередача. – 1976. – Т. 98, № 3. – С. 162–167.
57. Шершиев, А.А. Искажающее влияние термопары на температурное поле нагреваемого тела низкой теплопроводности. / А.А. Шершиев, Э.Б. Михайлов // Изв. Вузов. Машиностроение. – 1975. – Т. 18, № 8. – С. 110–115.

58. Чен,. Минимизация искажения в распределении температуры, обусловленного наличием полости для термопары / Чен, Ли. // Ракетные и Космические Технологии. –1977. – Т. 15. № 6. – С. 125–127.
59. Падерин,. Л.Я. Расчетное исследование погрешностей контактного метода измерения температур поверхностей неметаллических материалов в условиях лучистого теплообмена / Л.Я Падерин. // Теплофизика Высоких Температур. –1981. – Т. 19, № 6. – С. 1277–1284.
60. Кельтнер,. Погрешности измерения температур поверхностей / Кельтнер, Бек. // Теплопередача. – 1983. – Т. 105, № 2. – С. 99–106.
61. Елисеев, В.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование погрешности измерения температуры термопарами в теплоизоляционных материалах. / В.Н. Елисеев, В.А. Соловов. // Инженерно-Физический Журнал. – 1983. – Т. 45, № 5. – С. 737–742.
62. Заровная, Н.Н. Анализ локальных тепловых возмущений в полупрозрачных объектах / Н.Н. Заровная, Н.А. Ярышев. // Сб.ст. VII Всесоюз. конф. по тепломассообмену "Тепломассообмен-7". – Минск, 1984. – Т. 7. – С. 58–62.
63. Елисеев, В.Н. Погрешности измерения температур термопарами в полупрозрачных материалах / В.Н. Елисеев, В.А. Соловов. // Гелиотехника. – 1983. – № 6. – С. 45–49.
64. Симбирский, Д.Ф. Оптимальное планирование экспериментально-расчетного определения теплопроводности твёрдых тел в режиме нестационарного нагрева / Д.Ф. Симбирский, А.Б. Гулей. // Инженерно-Физический Журнал. – 1983. – Т. 45, № 5. – С. 732–737.
65. Налимов, В.В. Теория планирования эксперимента / В.В Налимов. – М.: Наука, 1970. – 243 с.
66. Мушник, Э. Методы принятия технических решений: пер. с нем. / Э Мушник., П. Мюллер. – М.: Мир, 1990. – 208 с., ил.

67. Подиновский, В.В. Оптимизация по последовательно применяемым критериям / В.В. Подиновский, В.М. Гаврилов. – М.: Советское радио, 1975. – 192 с.
68. Сергеев, О.А. Метрологические основы теплофизических измерений / О.А. Сергеев. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 154 с.
69. Серeda, Г.Н. Исследования по применению решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности к определению теплофизических свойств керамических материалов в условиях одностороннего нагрева / Г.Н. Серeda, С.В. Резник, М.Ю. Русин // Сб. тез. докл. XVII Междунар. науч.– техн. конф. "Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов". – Обнинск, 2004. – С. 62–64.
70. Серeda, Г.Н. Оптимизация параметров эксперимента при определении теплофизических свойств материалов на основе имитационной модели / Г.Н. Серeda // Сб. тез. докл. XVII Междунар. науч.– техн. конф. "Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов". – Обнинск, 2004. – С. 157–159.
71. Резник, С.В. Определение теплофизических свойств конструкционных керамических материалов на основе решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности / С.В. Резник, М.Ю. Русин, П.В. Просунцов, Г.Н. Серeda. // Сб. тез. докл. XXVII Сибирского теплофизического семинара, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе. – М.–Новосибирск, 2004. – С. 134-135.
72. Серeda, Г.Н. К вопросу повышения эффективности процесса определения теплофизических свойств конструкционных керамических материалов / Г.Н. Серeda, С.В. Резник, М.Ю. Русин, П.В. Просунцов // Сб. тез. докл. III Междунар. конф. "Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий. МЕЕ-2004". – Киев, 2004. – С. 224.

73. Русин, М.Ю. Определение теплофизических свойств керамических материалов АО в области температур от нормальной до 1200 °С в условиях одностороннего нагрева методом решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности / М.Ю. Русин, Г.Н. Середа // Сб. тез. докл. III Междунар. конф. "Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий. МЕЕ-2004". – Киев, 2004. – С. 231.
74. Ильченко, О.Т. Расчёты теплового состояния конструкций / О.Т. Ильченко. – Харьков: Вища школа, Изд-во при Харьк. ун-те, 1979. – 168 с.
75. Лампы накаливания галогенные: Инструкция по эксплуатации ИЖШЦ.675490.002 РЭ. – Саранск: б.и., 2005. – 8 с.
76. Шлыков, Ю.П. Контактный теплообмен / Ю.П. Шлыков, Е.Н. Ганин. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 402 с.
77. Русин, М.Ю. Автоматизированная установка определения теплофизических свойств неэлектропроводных материалов при одностороннем скоростном нагреве / М.Ю. Русин, Г.Н. Середа и др. // Сб. тез. докл. XVII Междунар. науч.– техн. конф. "Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов". – Обнинск, 2004. – С. 64–68.
78. Резник, С.В. Автоматизированный комплекс для высокотемпературных исследований теплофизических характеристик керамических материалов / С.В. Резник, А.С. Хамицаев, С.А. Анучин, Г.Н. Середа, П.А. Степанов. // Сб. тез. докл. Междунар. конф. «Ракетные и Космические Технологии. РКТ– 05», МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2005. – С. 172–174.
79. А.с. RU 1594501 G 05 D 23/19. Устройство для измерения и регулирования температуры поверхности объекта/ Г.Н. Середа, Ю.А. Грацианский.
80. Анучин, С.А., Методика высокотемпературных исследований теплофизических свойств керамических материалов аэрокосмического назна-

чения / С.А. Анучин., Г.Н. Середя, П.А. Степанов. // Огнеупоры и техническая керамика.– 2010.– №4,5. – С. 41– 45.

81. Забейайлов, М.О. Сравнительный анализ различных методов определения коэффициента теплопроводности в частично прозрачном материале на основе кварцевого стекла / М.О. Забейайлов, С.А. Анучин, Г.Н. Середя. // Сб. тез. докл. VI Междунар. конф. "Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий. МЭЕ-2010". – Киев, 2010. – С. 197.

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

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

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

85. Резник, С.В. Особенности контактной термометрии в элементах конструкций из перспективных материалов / С.В. Резник, Д.С. Минаков, С.А. Румянцев, Г.Н. Середя и др. // Аэрокосмические технологии: Научные материалы 3-й междунар. конф. (20-21 мая 2014, Реутов-Москва), – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – С. 175-176.