Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт **Энергетический**
Направление подготовки **130401 Теплоэнергетика и теплотехника**
Кафедра **Атомных и тепловых электростанций**

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка метода и конструирование установки для измерения коэффициента теплопроводности образцов в форме прямоугольного параллелепипеда

УДК 538.9(075.8)

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4А	**Яценко Константин Максимович**		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры АТЭС	**Ю.Я. Раков**	**к.т.н., доцент**		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ст. преподаватель кафедры менеджмента	**Н.Г. Кузьмина**	**-**		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности	**Ю.В. Бородин**	**к.т.н., доцент**		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент кафедры атомных и тепловых электростанций	**В.Н. Мартышев**	**-**		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
атомных и тепловых электростанций	**А.С. Матвеев**	**к.т.н., доцент**		

Томск – 2016 г.

Планируемые результаты обучения

Код резу ль-тата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	Универсальные компетенции	
Р1	Использовать представления о методологических основах научного познания и творчества, анализировать, синтезировать и критически оценивать знания	Требования ФГОС (ОК - 8, 9; ПК-4), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р2	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-3; ПК-8, 24), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р3	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы, состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации, осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ОК-4, 5; ПК-3, 16, 17, 25, 27, 28, 32), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р4	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах устойчивого развития.	Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп.2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р5	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

	Профессиональные компетенции	
P6	Использовать глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания для создания и применения инновационных технологий в теплоэнергетике	Требования ФГОС (ПК-1, 5), Критерии 5 АИОР (п.1.1), согласованные с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Применять глубокие знания в области современных технологий теплоэнергетического производства для постановки и решения задач инженерного анализа, связанных с созданием и эксплуатацией теплотехнического и теплотехнологического оборудования и установок, с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов теплоэнергетики	Требования ФГОС (ПК-2, 7, 11, 18 – 20, 29, 31), Критерий 5 АИОР (пп.1.1, 1.2, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P8	Разрабатывать и планировать к разработке технологические процессы, проектировать и использовать новое теплотехнологическое оборудование и теплотехнические установки, в том числе с применением компьютерных и информационных технологий	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 12 – 15, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Использовать современные достижения науки и передовой технологии в теоретических и экспериментальных научных исследованиях, интерпретировать и представлять их результаты, давать практические рекомендации по внедрению в производство	Требования ФГОС (ПК-6, 22 – 24,), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	Применять методы и средства автоматизированных систем управления производства, обеспечивать его высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на теплоэнергетическом производстве, выполнять требования по защите окружающей среды.	Требования ФГОС (ПК-21, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Р11	Готовность к педагогической деятельности в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ПК-32), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт	**Энергетический**
Направление подготовки	**130401 Теплоэнергетика и теплотехника**
Кафедра	**Атомных и тепловых электростанций**

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой АТЭС ЭНИН
А.С. Матвеев

_______________ _______________
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ4А	**Яценко Константину Максимовичу**

Тема работы:

Разработка метода и конструирование установки для измерения коэффициента теплопроводности образцов в форме прямоугольного параллелепипеда	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	**20.04.2016 № 3056/с**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	**20 мая 2016 года**

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе *(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).*	Цель работы разработка метода и конструкции установки для измерения коэффициента теплопроводности твердых тел в форме прямоугольного параллелепипеда неразрушающим методом. Среда образца - высокий вакуум.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов *(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).*	1. Обзор литературы 2. Математическая постановка задачи 3. Выбор метода решения 4. Составление программы решения стационарной трехмерной прямой задачи теплопроводности и ее отладка 5. Составление программы решения стационарной трехмерной обратной задачи и ее отладка. 6. Имитационное моделирование определения коэффициента теплопроводности 7. Конструирование и расчет элементов экспериментальной установки для определения коэффициента теплопроводности. 8. Английский язык 9. Экономика 10. Экологические аспекты 11. Заключение
Перечень графического материала *(с точным указанием обязательных чертежей)*	Принципиальная схема установки, сборочный чертеж вакуумной камеры, компоновочный чертеж стенда, деталировка нестандартных изделий, результаты имитационного моделирования

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	**Н.Г. Кузьмина, старший преподаватель кафедры менеджмента**
Социальная ответственность	**Ю.В. Бородин, доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности**

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: Обзор литературы. Постановка коэффициентной обратной стационарной задачи теплопроводности для прямоугольного параллелепипеда. Выбор метода решения. Составление конечно – разностных уравнений.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	**28 декабря 2015 года**

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АТЭС	Раков Ю.Я.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4А	**Яценко Константин Максимович**		

Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 116 страниц, 20 рисунков, 22 таблиц, 15 источников и 3 приложений.

Ключевые слова: теплопроводность, трехмерная задача, оптическая печь, вакуум.

Объектом исследования является лабораторный стенд для исследования теплопроводности твердых материалов в форме параллелепипеда.

Цель работы – разработка метода и конструирование установки для измерения коэффициента теплопроводности образцов в форме прямоугольного параллелепипеда.

В процессе выполнения работы была составлена программа решения прямой и обратной трехмерной стационарной задачи теплопроводности для прямоугольного параллелепипеда в среде Pascal. Разработана принципиальная схема лабораторной установки. Рассмотрены вопросы: производственная, пожарная и электробезопасность при выполнение работ на установке. Рассчитано освещение в лабораторном помещении и уровень шума при работе оборудования.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: работа в широком спектре температур, высокая точность результатов, универсальность.

Степень внедрения: теплоэнергетическая промышленность.

Область применения: любая отрасль техники.

Экономическая эффективность установки заключается в ее универсальности.

В будущем планируется улучшение и совершенствование методов изучения коэффициента теплопроводности.

Определения и обозначения

Теплопроводность – способность тел к переносу энергии (теплообмену) от более нагретых частей к менее нагретым телам.

Коэффициент теплопроводности – коэффициент учитывающий количество теплоты, проходящее через однородный образец материала единичной длины и единичной площади за единицу времени при единичной разнице температур. В системе СИ единицей измерения коэффициента теплопроводности является Вт/(м·K).

Плотность теплового потока – количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности. Единицей измерения плотности теплового потока является Вт/м^2.

Степень черноты – энергетическая характеристика тела, равная отношению энергии теплового излучения данного тела, к излучению «абсолютно черного тела» при той же температуре. Коэффициент излучения абсолютно черного тела $\varepsilon = 1$.

Оглавление

Введение

Применение математического моделирования очень важно для проверки точности и понимания изучаемых теплофизических и физико-механических процессов путем сравнения численных и экспериментальных данных. Математическое моделирование в настоящее время интенсивно развивается.

В данной дипломной работе рассматривается стационарный метод измерения коэффициента теплопроводности, в котором используется решение трехмерной задачи теплопроводности при косвенном нагреве исследуемого образца с помощью оптической печи.

Основной сложностью данного метода является обработка результатов измерений в виду того, что задача не имеет аналитического решения, поскольку в ней присутствуют нелинейные граничные условия. Ее решение может быть найдено численными методами

С появлением производительных электронных вычислительных машин стало возможным решать задачи теплопроводности для двухмерных и трехмерных температурных полей с помощью сравнительно не сложных экспериментальных установок.

Существенным преимуществом этого метода является: возможность использования образцов небольших размеров, высокая точность, относительно не высокое время измерения, широкий интервал температур.

Недостатком метода является необходимость измерения распределения температур по поверхности образца.

1 Обзор литературы

Обзор литературы за последние несколько лет показал, что в настоящее время для измерения коэффициента теплопроводности наиболее часто применяется стационарный метод пластины. Одним из основных преимуществ данного метода является простота расчетных формул, поскольку используется решение одномерной задачи теплопроводности. Главной же проблемой является создание одномерного теплового потока, проходящего через исследуемый образец. С ростом температур задача организации одномерного теплового потока усложняется, что в свою очередь приводит к усложнению конструкции измерительной установки. Метод пластины для измерения коэффициента теплопроводности применяется уже давно и имеет большую базу конструкторских решений при проектировании измерительных установок для конкретных случаев. Ниже приведены некоторые варианты измерительных установок основанные на данном методе.

1.1 Определение коэффициента теплопроводности сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий

Сравнительно недавно на рынке теплоизолирующих покрытий стали появляться современные сверхтонкие жидкие композиционные теплоизолирующие покрытия (теплоизолирующие краски). Они обладают хорошими теплоизолирующими качествами (например, коэффициент теплопроводности таких материалов примерно равен $\lambda = 0{,}001 - 0{,}0015\, Вт/(м \cdot °C)$) и производители заявляют о том, что такой слой теплоизолирующей краски толщиной от 1 до 3 мм, нанесенный на инженерные трубопроводы, может заменить изоляцию в несколько сантиметров толщиной известных минераловатных утеплителей.

Теплофизические свойства подобных теплоизолирующих покрытий до конца еще не изучены. Поэтому с целью определения коэффициента теплопроводности теплоизолирующих красок, как одного из основных теплотехнических характеристик таких покрытий был проведен эксперимент по существующей нормативной методике при стационарном тепловом режиме [1].

Для проведения эксперимента был разработан измерительный комплекс, который включал в себя:

1. Устройство для тестирования образцов (рис. 1).

2. Прибор марки «Терем – 4.0» для измерения показаний от термопар.

3. Термопары «хромель – копелевые», изготовленные из проводов толщиной $\delta = 0,2 мм$.

4. Пластина из материала с известным коэффициентом теплопроводности (оргстекло, толщиной $\delta = 3,2 мм$, $\lambda = 0,19\, Вт/(м \cdot °C)$).

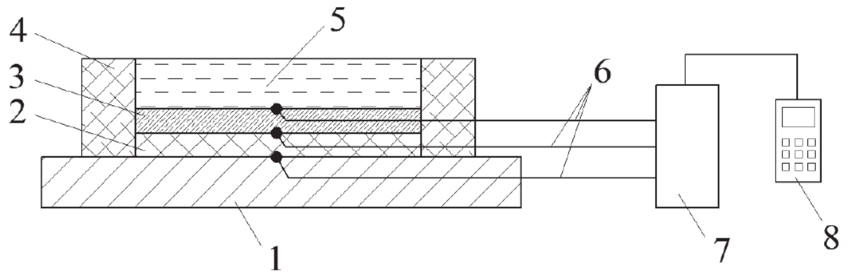

Рисунок 1 – Принципиальная схема измерительного комплекса

1 – источник стационарного теплового потока; 2 – слой материала с известной толщиной и коэффициентом теплопроводности; 3 – слой теплоизолирующей краски; 4 – теплоизолятор (пенопласт); 5 – «холодильник» (емкость с водой); 6 – термопары между слоями; 7 – коммутатор; 8 – прибор для измерения «Терем – 4.0»

Эффективную теплопроводность материала образца λ_{effu} вычисляют по формуле (1.1):

$$\lambda_{effu} = \frac{d_u}{\dfrac{\Delta T_u}{q_u} - 2R_L}, \tag{1.1}$$

где d_u – толщина образца в процессе испытания, м; ΔT_u – разность температур лицевых граней испытываемого образца, $°C$; q_u – плотность стационарного теплового потока, проходящего через испытываемый образец, $Вт/м^2$; R_L – термическое сопротивление листового материала, из которого изготовлены дно и крышка ящика для образца насыпного материала, $(м^2 \cdot °C)/Вт$.

Краска слоя № 3 (рис. 1) наносилась равномерно на медную пластину, толщиной 0,5 мм. Сопротивление теплопередаче медной пластины учитывалось при расчете по формуле (1.1) как составляющая R_L.

Удельный тепловой поток q_u, $Вт/м^2$, в зависимости (1.1) определялся по формуле:

$$q_u = \frac{\lambda_{слой\,2}\left(t_1 - t_2\right)}{\delta_{слой\,2}},$$

где $\lambda_{слой\,2}$, $\delta_{слой\,2}$ – коэффициент теплопроводности и толщина слоя оргстекла (рис. 1); t_1, t_2 – температуры на границах «источник теплоты – слой оргстекла» и «слой оргстекла – испытуемый образец» (рис. 1).

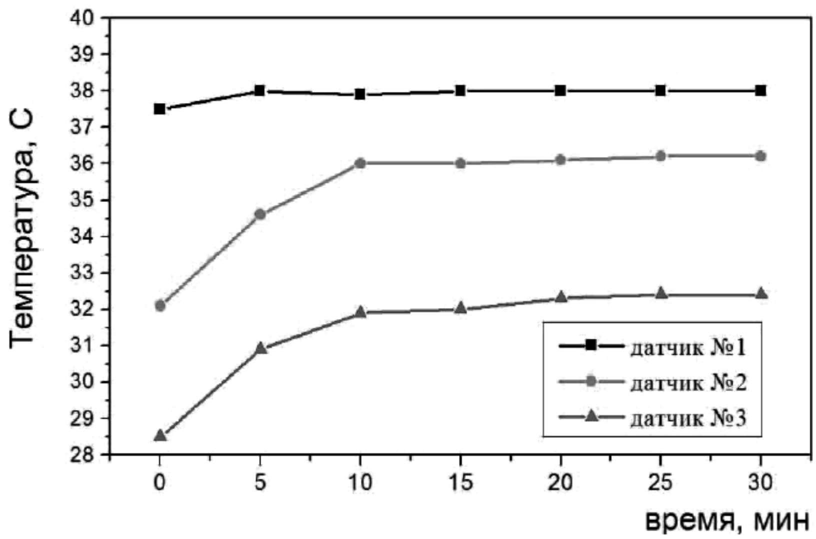

Рисунок 2 – Показания прибора по данным от 3 – х датчиков термопар по времени

Из представленного графика видно, что показания прибора выходили на стационарный уровень через 20 минут после начала его работы, что было учтено при проведении экспериментов.

Измерения проводились для двух образцов краски в разных температурных режимах при различном тепловом потоке. Это делалось с целью анализа динамики изменения коэффициента теплопроводности от температуры.

Погрешность измерения составила $\varepsilon = 1{,}85\%$. Итоговая погрешность определения теплопроводности с учетом погрешности метода исследования (3 %) и погрешности прибора (1 %) составила 5,85 %.

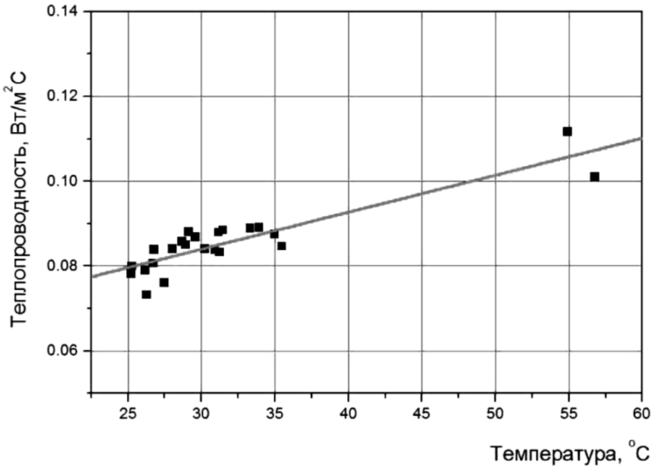

Рисунок 3 – Результаты эксперимента по определению теплопроводности краски для образца № 1

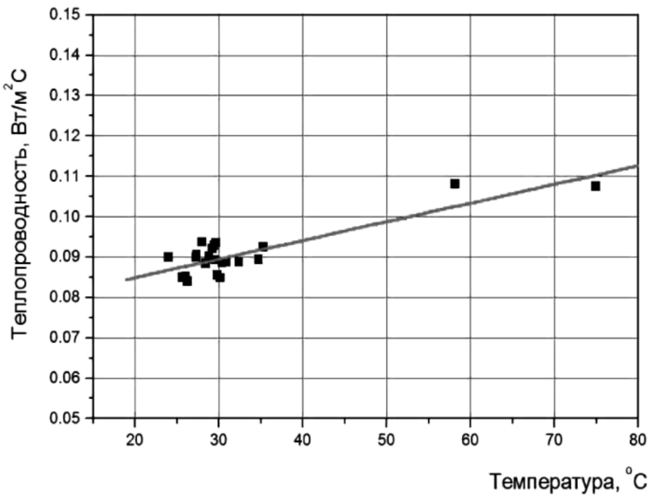

Рисунок 4 – Результаты эксперимента по определению теплопроводности для образца № 2

1.2 Измерение теплопроводности теплозащитных покрытий

Авторы работы [2] разработали установку для измерения теплопроводности с использованием сравнительного метода измерения, при котором в образце создается одномерный тепловой поток, а все полученные данные регистрируются на компьютере.

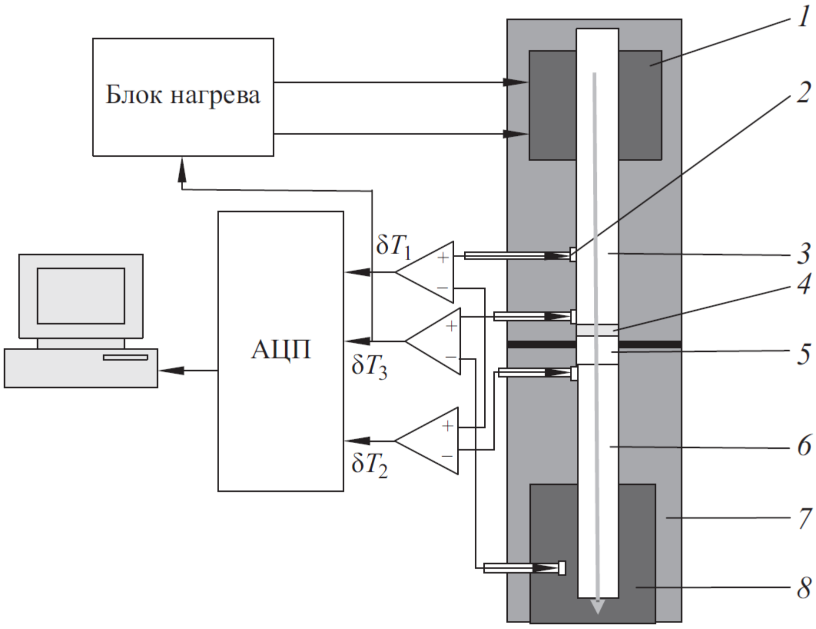

Рисунок 5 –Схема установки для измерения теплопроводности
1 – термостат ($T \approx 373K$); 2 – датчики температуры; 3, 6 – вставки; 4 – покрытие; 5 – исследуемый образец; 7 – теплоизоляция; 8 – термостат ($T \approx 273K$).

На рисунке 5 приведена схема установки для измерения теплопроводности теплозащитных покрытий, состоящая из трех дифференциальных усилителей, тепловой камеры, разработанного трехканального аналого – цифрового преобразователя (АЦП), подключенного к персональному компьютеру (ПК) с установленным программным обеспечением измерений [2].

Вставки выполнены из известного материала (23% Fe, 61% Ni, 16% Cr) с известным коэффициентом теплопроводности λ_1 в виде стержня круглого сечения диаметром в 14 мм и одинаковых размеров.

Верхняя вставка имеет известный коэффициент теплопроводности λ_1, поэтому возможно вычислить плотность теплового потока, проходящую через верхнюю вставку – образец – нижнюю вставку:

$$q_1 = \lambda_1 c_1 dU_1, \tag{1.2}$$

где dU_1 – сигнал с верхнего усилителя, который пропорционален градиенту температуры δT_1 верхней вставки; c_1 – коэффициент пропорциональности между градиентом температуры вставки и сигналом на выходе усилителя.

Плотность теплового потока, проходящая через образец $q_{обр}$ пропорциональна плотности теплового потока верхней вставки q_1 с коэффициентом пропорциональности c_x. Это позволяет учесть тепловые потоки, проходящие мимо образца. Следовательно для образца имеем:

$$q_{обр} = c_x q_1 = \lambda_{обр} c_2 dU_2,$$

где dU_2 – сигнал с нижнего усилителя, который пропорционален градиенту температуры δT_2 образца; c_2 – коэффициент пропорциональности между градиентом температуры образца и сигналом на выходе усилителя; $\lambda_{обр}$ – коэффициент теплопроводности образца.

Рассчитав из (1.2) плотность теплового потока, проходящую через образец, а так же зная перепад температуры в образце, можно определить коэффициент теплопроводности образца:

$$\lambda_{обр} = C\lambda_1 \frac{dU_1}{dU_2},$$

где $C = c_x c_1 / c_2$ – приборный коэффициент, который характеризует чувствительность измерений температуры и учитывает геометрию расположения датчиков температуры. Эту величину определяют при проведении дополнительных измерений, когда вместо исследуемого образца устанавливают образец с известной теплопроводностью.

1.3 Точное измерение сверхвысокого коэффициента теплопроводности материала на тонких пластинах

Новейшие компоненты силовой электроники могут выделять большое количество тепла. Чтобы обеспечить надежность их работы в настоящее время разрабатываются устройства для теплоотвода с применением пластин из синтетических алмазов, обладающих сверхвысокой теплопроводностью. Для создания современных устройств силовой электроники большое значение имеет точное измерение коэффициента теплопроводности таких материалов [3].

Был разработан метод для измерения теплопроводности пластин из поликристаллических алмазов. Данный метод предполагает нанесение с обеих сторон пластины двух тонкоплёночных термометров сопротивления, которые выполнены по мостовой схеме. Пластина нагревается с помощью контакта с горячим медным стержнем с одной стороны, в месте расположения одного из термометров сопротивления. Охлаждение пластины производится с противоположной стороны (в месте расположения другого термометра сопротивления) с помощью контакта с медным стержнем, охлаждаемым водой. Протекающий через пластину тепловой поток измеряется с помощью термопар, которые установлены на горячем медном стержне, и регулируются автоматическим устройством. Тонкоплёночные термометры сопротивления нанесены с помощью метода вакуумной депозиции. Толщина таких покрытий составляет 50 нанометров и является практически одним целым с поверхностью пластины. Поэтому можно говорить о том, что измеряемые температуры соответствуют температурам на противоположных поверхностях пластины.

Благодаря повышенному сопротивлению резисторов тонкоплёночных термометров обеспечивается их высокая чувствительность, это позволяет использовать напряжение питания моста не менее 20 В [3].

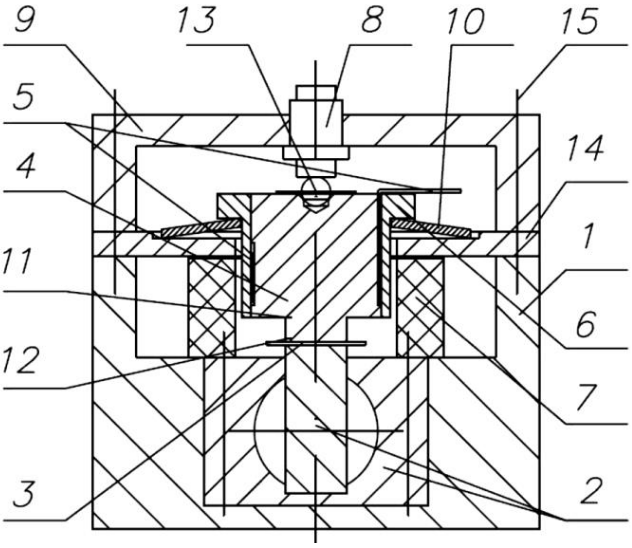

Рисунок 6 – Схема измерительной установки

1 – корпус; 2 – корпус охлаждения; 3 – алмазная пластина; 4 – стержень нагревателя; 5 – нихромовая проволока; 6 – стакан; 7 – теплоизоляция; 8 – винт микрометрический; 9 – крышка корпуса; 10 – пружина тарельчатая; 11,12 – термопары; 13 – стальной шарик; 14 – опорная пластина; 15 – винт.

Температура, измеряемая термопарой 11 равна T_1, температура измеряемая термопарой 12 равна T_2, температура на поверхности пластины 3 со стороны нагревателя равна T_3, температура на поверхности пластины 3 со стороны охладителя равна T_4, температура воды равна T_w.

В описанном устройстве теплообменные процессы характеризуются следующими уравнениями:

$$w_{el}\eta = \frac{\lambda_m (T_1 - T_2)}{l} \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\frac{\lambda_m (T_1 - T_2)}{l} = \frac{\lambda_a}{t}(T_3 - T_4)$$

$$\frac{\lambda_a}{t}(T_3 - T_4)\frac{\pi d^2}{4} = \gamma_w (T_4 - T_w) S_w$$

$$\gamma_w (T_4 - T_w) S_w = cV \frac{\pi D^2}{4} \Delta T_w$$

где w_{el} – электрическая мощность нагревателя; η – коэффициент полезного действия нагревателя; λ_m – теплопроводность меди; l – длина контактного стержня; d – диаметр контактного стержня; λ_a – ожидаемая теплопроводность пластины 3; t – толщина пластины; γ_w – коэффициент отвода тепла для скорости воды V; S_w – площадь поверхности охлаждения; c – объемная теплоёмкость воды; D – диаметр водопроводной трубки в корпусе охлаждения; ΔT_w – изменение температуры воды.

По утверждению авторов этой работы, с помощью данного метода и средств измерений можно производить измерения коэффициента теплопроводности пластин из синтетических алмазов с высокой точностью.

1.4 Устройство для измерения теплопроводности полупроводников и их расплавов при высоких температурах

Описанная ниже установка разработана и предложена авторами статьи [4] для исследования теплопроводности полупроводников и их расплавов в широком температурном интервале (300 – 1100K). В отличие от ранее используемых в этих целях устройств, измерение теплопроводности проводили в герметически закрытом автоклаве, заполненным после вакуумирования спектрально чистым аргоном для предотвращения окисления, испарения или разложения исследуемого вещества.

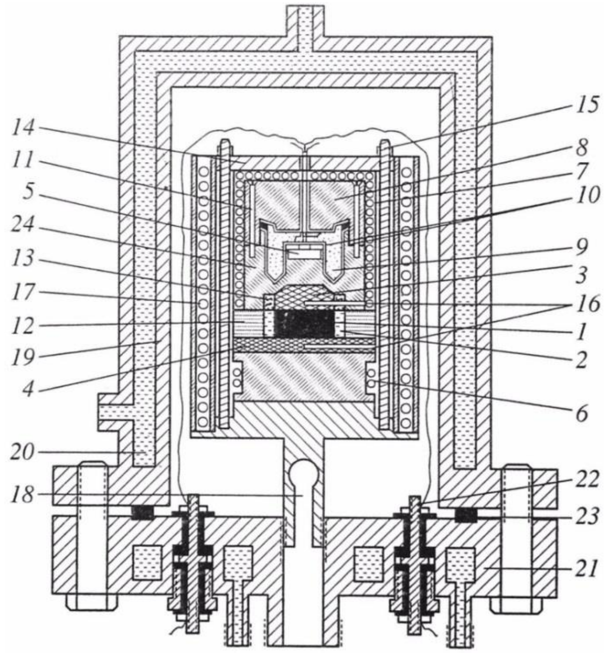

Рисунок 7 – Схема установки для измерения теплопроводности полупроводников и их расплавов

1 – исследуемый образец; 2 – кварцевая ячейка; 3, 4 – рабочие поверхности градиентного нагревателя; 5 – градиентный нагреватель; 6 – холодильник; 7 – компенсационный нагреватель; 8 – верхняя часть каркаса прибора из нержавеющей стали; 9 – слой закиси меди; 10 – медная фольга; 11 – зажимной болт; 12, 13 – теплоизоляционный материал; 14 – груз; 15 – болт; 16 – термопары; 17 – режимный нагреватель; 18 – патрубок; 19 – автоклав; 20 – термостатирующая жидкость; 21 – крышка автоклава; 22 – зажимы; 23 – фторопластовые прокладки; 24 – нижняя часть каркаса прибора.

На рисунке 7 приведена схема установки для измерения теплопроводности полупроводников и их расплавов. Тепловой поток от градиентного нагревателя 5 проходит через исследуемый образец 1. Перепад температуры на образце ΔT измеряется термопарами 16. В пренебрежении боковыми и тепловыми потерями (полагая, что распределение температуры вдоль экранов, окружающих образец, практически совпадает с распределением температуры вдоль образца) теплопроводность материала можно вычислить по формуле:

$$\lambda = \frac{IU}{\Delta T}\frac{L}{S},$$

где I – ток, проходящий через нагреватель; U – напряжение на зажимах градиентного нагревателя; S и L – площадь поперечного сечения и толщина исследуемого образца.

Суммарная погрешность определения теплопроводности, обусловленная погрешностями измерения тока, напряжения, средней температуры и геометрических размеров образца, не превышает 6% при 1000К. При вычислении систематических ошибок следует учитывать тепловые потери по токоподводящим и термопарным проводам, по слою закиси меди, кварцевому кольцу и теплоизоляционному материалу. По оценкам авторов данной работы эти потери не превышают 2% от теплового потока, проходящего через образец.

1.5 Устройство для измерения теплопроводности

В данной работе описывается устройство для определения теплопроводности абсолютным стационарным методом плоского слоя, содержащее измерительный прибор и ячейку. Прибор (рис. 8) изготовлен из меди, содержит охранный элемент в виде пористого стакана, насыщенного термоэлектриком, который в паре с медью имеет высокую термоэдс, что позволяет контролировать тепловые потери с высокой точностью. Ячейка изготовлена из стали 12Х18Н10Т, снабжена сильфоном. Устройство позволяет с погрешностью $\pm 1,2\%$ определять теплопроводность газов, твердых тел, жидкостей в интервале температур 100 – 700 К и давлениях до 100 Мпа [5].

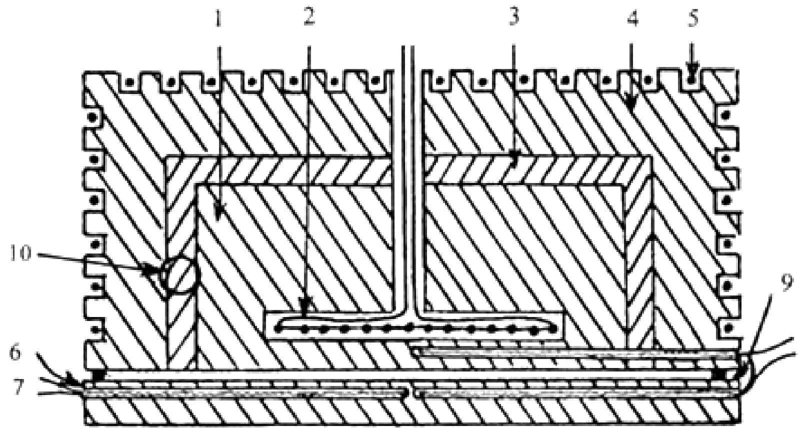

Рисунок 8 – Прибор для измерения теплопроводности

1, 4 – внутренний и наружный медные блоки; 2,5 – внутренний и наружный нагреватели; 3 – керамический охранный стакан; 6 – «холодильник»; 7, 8 – абсолютная (T) и дифференциальная (ΔT) термопары; 9 – фиксированный зазор; 10 – разрез керамического стакана.

Коэффициент теплопроводности (λ) оценивается по закону Фурье по формуле для стационарного метода плоского горизонтального слоя:

$$\lambda = P \cdot L \cdot S^{-1} \cdot \Delta T^{-1}$$

где λ – коэффициент теплопроводности; P – мощность внутреннего нагревателя, прошедшая через образец; L – толщина образца; S – эффективная рабочая поверхность прибора; ΔT – перепад температуры на образце.

Также в данной работе были рассчитаны неконтролируемые потери тепла через цилиндрическую поверхность 3:

$$\Delta Q = (\lambda \pi r^2 \Delta T) L^{-1}$$

где λ – теплопроводность материала цилиндра; ΔT – разность температур между внутренней и наружной поверхностью 3; r – внутренний радиус цилиндра; L – толщина стенки цилиндра.

Применение отдельной ячейки позволяет измерять этим устройством большой спектр веществ в широком интервале параметров состояния. По заявлению автора данной работы устройство не имеет аналогов у нас в стране и за рубежом.

2 Использование трехмерной задачи для определения коэффициента теплопроводности

2.1 Постановка коэффициентной обратной стационарной задачи теплопроводности для прямоугольного параллелепипеда

Рассмотрим стационарную задачу теплопроводности для прямоугольного параллелепипеда (рис. 9).

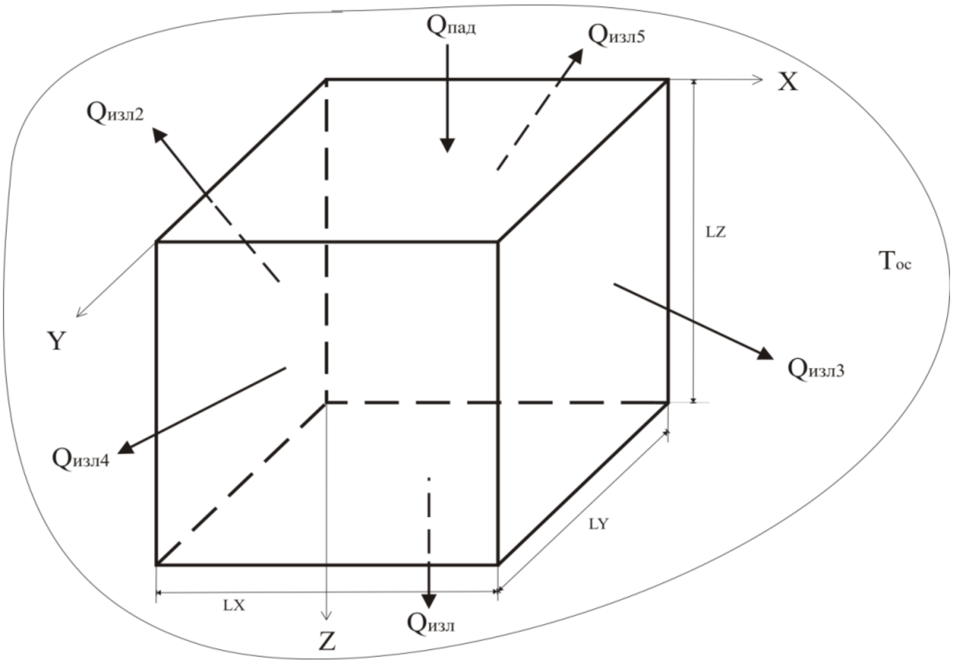

Рисунок 9 – Схема распределения тепловых в исследуемом образце в форме параллелепипеда [6]

Исследуемый объект представляет с собой образец в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами LX, LY, LZ. Образец находится внутри вакуумной камеры, где нагревается тепловым потоком с одной из его граней и теряет тепло со всех сторон в окружающую среду путем излучения. Температура окружающей среды постоянная T_{oc}. Примем постоянными интегральную степень черноты ε и коэффициент поглощения поверхности образца A, а коэффициент теплопроводности λ не зависящим от температуры.

Математическая постановка обратной стационарной задачи теплопроводности для прямоугольного параллелепипеда включает уравнение теплопроводности (2.1), нелинейные граничные условия (2.2 – 2.7) и экстремальное условие (2.8):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} = 0, \qquad (2.1)$$

$$q_F(X,Y) \cdot A = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial Z} \right)_{Z=0} + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4_{Z=0} - T^4_{oc}), \qquad (2.2)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial Z} \right)_{LZ} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4_{LZ} - T^4_{oc}), \qquad (2.3)$$

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial X} \right)_{X=0} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4_{X=0} - T^4_{oc}), \qquad (2.4)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial X} \right)_{LX} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4_{LX} - T^4_{oc}), \qquad (2.5)$$

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial Y} \right)_{Y=0} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4_{Y=0} - T^4_{oc}), \qquad (2.6)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial Y} \right)_{LY} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4_{LY} - T^4_{oc}), \qquad (2.7)$$

$$\left| Q_{LZ} - \varepsilon\sigma \int_F \left[T^4\left(z = LZ\right) - T^4_{oc} \right] \partial F \right| \to \min \qquad (2.8)$$

где $T(X,Y,Z)$ – температура тела; X,Y,Z – декартовые координаты; σ – постоянная Стефана – Больцмана; LX, LY, LZ – размеры образца; $q_F(X,Y)$ – плотность подающего теплового потока; λ – коэффициент теплопроводности; ε – степень черноты; A – коэффициент поглощения; Q_{LZ} – интегральный тепловой поток, уходящий с нижней грани образца.

Как следует из математической постановки обратной задачи, для вычисления коэффициента теплопроводности образца необходимо экспериментально определить плотность падающего теплового потока q_F, интегральный тепловой поток Q_{LZ}, уходящий с нижней грани образца, и температуру окружающей среды T_{oc}. Геометрические размеры и радиационные характеристики ε и A образца должны быть известны.

2.2 Выбор метода решения

Из общей математической постановки обратной коэффициентной стационарной задачи теплопроводности следует, что многократное использование решения прямой задачи теплопроводности при различных численных значениях коэффициента теплопроводности необходимо для вычисления минимума целевого функционала (2.8). Поэтому на эффективность решения обратной задачи в значительной мере оказывает влияние выбора оптимального метода решения прямой задачи.

Для решения нелинейных задач необходимы численные методы, с помощью которых можно получить таблицу приближенных значений. Для данной задачи был выбран метод конечных разностей. Решение полученных конечно – разностных уравнений осуществлялось итерационными методами: метод одновременных смещений (метод простой итерации) и метод последовательной верхней релаксации (ускоренный метод Либмана). Для решения обратной задачи по определению коэффициента теплопроводности использовался метод одномерной оптимизации – метод дихотомии.

2.3 Составление конечно – разностных уравнений

Идея метода конечных разностей решения краевых задач заключается в замене производных в дифференциальном уравнении их конечно разностными аппроксимациями. Для аппроксимации уравнений использовался интерполяционный многочлен Лагранжа второй степени, построенный по трем последовательным точкам [7]. Конечно – разностная аппроксимация уравнений (2.1 – 2.7) имеет следующий вид:

$$\frac{\lambda}{\Delta x^2}\left(T_{i+1,j,k}+T_{i-1,j,k}\right)+\frac{\lambda}{\Delta y^2}\left(T_{i,j+1,k}+T_{i,j-1,k}\right)+\frac{\lambda}{\Delta z^2}\left(T_{i,j,k+1}+T_{i,j,k-1}\right)-2\lambda\cdot T_{i,j,k}\left(\frac{1}{\Delta x^2}+\frac{1}{\Delta y^2}+\frac{1}{\Delta z^2}\right)=0$$

$$q_F\cdot A+\frac{\lambda}{2\Delta z}(-T_{i,j,3}+4T_{i,j,2}-3T_{i,j,1})-\varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{i,j,1}^4-T_{oc}^4)=0,$$

$$-\frac{\lambda}{2\Delta z}(3T_{i,j,nz}-4T_{i,j,nz-1}-T_{i,j,nz-2})-\varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{i,j,nz}^4-T_{oc}^4)=0,$$

$$\frac{\lambda}{2\Delta x}(-T_{3,j,k}+4T_{2,j,k}-3T_{1,j,k})-\varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{1,j,k}^4-T_{oc}^4)=0,$$
$$-\frac{\lambda}{2\Delta x}(3T_{nx,j,k}-4T_{nx-1,j,k}-T_{nx-2,j,k})-\varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{nx,j,k}^4-T_{oc}^4)=0,$$
$$\frac{\lambda}{2\Delta y}(-T_{i,3,k}+4T_{i,2,k}-3T_{i,1,k})-\varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{i,1,k}^4-T_{oc}^4)=0,$$
$$-\frac{\lambda}{2\Delta y}(3T_{i,ny,k}-4T_{i,ny-1,k}-T_{i,ny-2,k})-\varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{i,ny,k}^4-T_{oc}^4)=0.$$

где i, j, k – точки в пространственной сетке; $T_{i,j,k}$ – температура в узлах пространственной сетки; nx, ny, nz – количество узлов сеточной области в направлениях осей x, y, z; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – шаги сеточной области.

Представим полученные конечно – разностные уравнения в коэффициентном виде:

$$T_{i,j,k}-s_2\left(T_{i+1,j,k}+T_{i-1,j,k}\right)-s_3\left(T_{i,j+1,k}+T_{i,j-1,k}\right)-s_4\left(T_{i,j,k+1}+T_{i,j,k-1}\right)=0$$

$$z=0,\ d_1T_{i,j,1}-d_2T_{i,j,2}+d_3T_{i,j,3}+d_4(T_{i,j,1}^4-T_{oc}^4)-d_5=0$$

$$z=L,\ d_1T_{i,j,nz}-d_2T_{i,j,\mathrm{nz}-1}+d_3T_{i,j,\mathrm{nz}-2}+d_6(T_{i,j,\mathrm{nz}}^4-T_{oc}^4)=0$$

$$y=0,\ b_1T_{i,1,\mathrm{k}}-b_2T_{i,2,k}+b_3T_{i,3,k}+b_4(T_{i,1,k}^4-T_{oc}^4)=0$$

$$y=L,\ b_1T_{i,\mathrm{ny,k}}-b_2T_{i,\mathrm{ny}-1,k}+b_3T_{i,\mathrm{ny}-2,k}+b_5(T_{i,\mathrm{ny},k}^4-T_{oc}^4)=0$$

$$x=0,\ c_1T_{1,j,\mathrm{k}}-c_2T_{2,j,k}+c_3T_{3,j,k}+c_4(T_{1,j,k}^4-T_{oc}^4)=0$$

$$x=L,\ c_1T_{\mathrm{nx},j,\mathrm{k}}-c_2T_{\mathrm{nx}-1,j,k}+c_3T_{\mathrm{nx}-2,j,k}+c_5(T_{\mathrm{nx},j,k}^4-T_{oc}^4)=0$$

где коэффициенты определяются соотношениями:

$s_1=2(\lambda/\Delta x^2+\lambda/\Delta y^2+\lambda/\Delta z^2),\ s_2=\lambda/\Delta x^2 s_1,\ s_3=\lambda/\Delta y^2 s_1,\ s_4=\lambda/\Delta z^2 s_1.$

$d_1=3d_3,\ d_2=4d_3,\ d_3=\lambda/2\Delta z,\ d_4=\varepsilon_{z=0}\sigma_0,\ d_5=q_F\,\mathrm{A},\ d_6=\varepsilon_{z=L}\sigma_0,$

$d_7=4d_4,\ d_8=4d_6.$

$b_1=3b_3, \mathrm{b}_2=4b_3,\ \mathrm{b}_3=\lambda/2\Delta y,\ \mathrm{b}_4=\varepsilon_{y=0}\sigma_0,\ \mathrm{b}_5=\varepsilon_{y=L}\sigma_0,\ b_6=4b_4,\ b_7=4b_5.$

$c_1=3c_3,\ \mathrm{c}_2=4c_3,\ \mathrm{c}_3=\lambda/2\Delta x,\ \mathrm{c}_4=\varepsilon_{x=0}\sigma_0,\ \mathrm{c}_5=\varepsilon_{x=L}\sigma_0,\ c_6=4c_4,\ c_7=4c_5.$

Полученные конечно – разностные уравнения решались итерационным методом одновременных смещений и методом последовательной верхней релаксации для внутренних точек [8].

Для реализации итерационного метода нелинейные уравнения для точек были преобразованы с помощью формулы Ньютона – Рафсона [6]:

а) Для метода одновременных смещений

$$T^n(i,j,k) = T^{n-1}(i,j,k) - \frac{f(T^{n-1}(i,j,k))}{f'(T^{n-1}(i,j,k))}$$

б) Для метода последовательной верхней релаксации

$$T^n(i,j,k) = T^{n-1}(i,j,k) + \omega \cdot \left(T^n(i,j,k) - T^{n-1}(i,j,k) \right)$$

где n – номер итерации; ω – параметр релаксации; i,j,k – индексы, определяющие положение узла в вычислительной сетке; $T^n(i,j,k)$ – новое значение температуры, рассчитанное данным методом; $T^n(i,j,k)$ – текущее значение температуры; $f(T^{n-1})$ – функция изменения температуры в узловой точке; $f'(T^{n-1})$ – производная функции изменения температуры в узловой точке.

После преобразования с помощью формулы Ньютона – Рафсона получим следующие конечно – разностные уравнения, которые применялись при составлении программы расчета температурного поля:

а) Для метода одновременных смещений

$$T^n_{i,j,k} = s_2\left(T^{n-1}_{i+1,j,k} + T^{n-1}_{i-1,j,k}\right) + s_3\left(T^{n-1}_{i,j+1,k} + T^{n-1}_{i,j-1,k}\right) + s_4\left(T^{n-1}_{i,j,k+1} + T^{n-1}_{i,j,k-1}\right).$$

$$T^n_{i,j,1} = T^{n-1}_{i,j,1} - \frac{d_1 T^{n-1}_{i,j,1} - d_2 T^{n-1}_{i,j,2} + d_3 T^{n-1}_{i,j,3} + d_4 (T^{4,n-1}_{i,j,1} - T^4_{oc}) - d_5}{d_7 T^{3,n-1}_{i,j,1} + d_1},$$

$$T^n_{i,j,nz} = T^{n-1}_{i,j,nz} - \frac{d_1 T^{n-1}_{i,j,nz} - d_2 T^{n-1}_{i,j,\mathrm{nz}-1} + d_3 T^{n-1}_{i,j,\mathrm{nz}-2} + d_6 (T^{4,n-1}_{i,j,\mathrm{nz}} - T^4_{oc})}{d_8 T^{3,n-1}_{i,j,\mathrm{nz}} + d_1},$$

$$T^n_{i,1,k} = T^{n-1}_{i,1,k} - \frac{b_1 T^{n-1}_{i,1,k} - b_2 T^{n-1}_{i,2,k} + b_3 T^{n-1}_{i,3,k} + b_4 (T^{4,n-1}_{i,1,k} - T^4_{oc})}{b_6 T^{3,n-1}_{i,1,k} + b_1},$$

$$T_{i,ny,k}^{n} = T_{i,ny,k}^{n-1} - \frac{b_1 T_{i,ny,k}^{n-1} - b_2 T_{i,\mathrm{ny}-1,k}^{n-1} + b_3 T_{i,\mathrm{ny}-2,k}^{n-1} + b_5 (T_{i,\mathrm{ny},k}^{4,n-1} - T_{oc}^{4})}{b_7 T_{i,\mathrm{ny},k}^{3,n-1} + b_1},$$

$$T_{1,j,k}^{n} = T_{1,j,k}^{n-1} - \frac{c_1 T_{1,j,k}^{n-1} - c_2 T_{2,j,k}^{n-1} + c_3 T_{3,j,k}^{n-1} + c_4 (T_{1,j,k}^{4,n-1} - T_{oc}^{4})}{c_6 T_{1,j,k}^{3,n-1} + c_1},$$

$$T_{nx,j,k}^{n} = T_{nx,j,k}^{n-1} - \frac{c_1 T_{nx,j,k}^{n-1} - c_2 T_{\mathrm{nx}-1,j,k}^{n-1} + c_3 T_{\mathrm{nx}-2,j,k}^{n-1} + c_5 (T_{\mathrm{nx},j,k}^{4,n-1} - T_{oc}^{4})}{c_7 T_{\mathrm{nx},j,k}^{3,n-1} + c_1},$$

б) Для метода последовательной верхней релаксации для внутренних точек

$$T_{i,j,k}^{n} = s_2 \left(T_{i+1,j,k}^{n} + T_{i-1,j,k}^{n} \right) + s_3 \left(T_{i,j+1,k}^{n} + T_{i,j-1,k}^{n} \right) + s_4 \left(T_{i,j,k+1}^{n} + T_{i,j,k-1}^{n} \right),$$

$$T_{i,j,k}^{n} = T_{i,j,k}^{n-1} + \omega \cdot \left(T_{i,j,k}^{n} - T_{i,j,k}^{n-1} \right).$$

В стационарном тепловом режиме тепловые потоки, поступающие в образец и уходящие с его поверхностей должны быть равны, т.е. должен соблюдаться интегральный тепловой баланс. Выражения, которые использовались для вычисления поступающих и уходящих тепловых потоков, приведены ниже:

$$Q_{вх} = A \cdot q_F \cdot LX \cdot LY \tag{2.9}$$

$$Q_{x=0} = \sum_{k=1}^{k=nz} \sum_{j=1}^{j=ny} \varepsilon \cdot \sigma (T_{1,j,k}^{4} - T_{oc}^{4}) \cdot \Delta y \cdot \Delta z \tag{2.10}$$

$$Q_{LX} = \sum_{k=1}^{k=nz} \sum_{j=1}^{j=ny} \varepsilon \cdot \sigma (T_{nx,j,k}^{4} - T_{oc}^{4}) \cdot \Delta y \cdot \Delta z \tag{2.11}$$

$$Q_{y=0} = \sum_{i=1}^{i=nx} \sum_{k=1}^{k=nz} \varepsilon \cdot \sigma (T_{i,1,k}^{4} - T_{oc}^{4}) \cdot \Delta x \cdot \Delta z \tag{2.12}$$

$$Q_{LY} = \sum_{i=1}^{i=nx} \sum_{k=1}^{k=nz} \varepsilon \cdot \sigma (T_{i,ny,k}^{4} - T_{oc}^{4}) \cdot \Delta x \cdot \Delta z \tag{2.13}$$

$$Q_{z=0} = \sum_{i=1}^{i=nx} \sum_{j=1}^{j=ny} \varepsilon \cdot \sigma (T_{i,j,1}^{4} - T_{oc}^{4}) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \tag{2.14}$$

$$Q_{LZ} = \sum_{i=1}^{i=nx} \sum_{j=1}^{j=ny} \varepsilon \cdot \sigma (T_{i,j,nz}^{4} - T_{oc}^{4}) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \tag{2.15}$$

где $Q_{вх}$ – интегральный тепловой поток, поступающий в образец; $Q_{ух}$ – суммарный тепловой поток, уходящий с образца; $Q_{z=0}$ – тепловой поток, уходящий с верхней границы образца; Q_{LZ} – тепловой поток уходящий с нижней границы образца; $Q_{x=0}, Q_{LX}, Q_{y=0}, Q_{LY}$ – тепловые потоки, уходящие с боковых границ образца.

2.4 Приведение математической постановки обратной задачи теплопроводности к безразмерному виду

Приведение задачи к безразмерному виду позволяет обычно существенно уменьшить число ее параметров. Такое преобразование в значительной степени облегчает исследование и помогает составить общее представление об изучаемой системе. После перехода к безразмерным переменным множество параметров, обычно входящих в уравнения, сводится к небольшому числу их безразмерных комбинаций. Разумным выбором этих комбинаций можно сократить число параметров преобразованной системы до минимума.

С помощью выбора новых масштабов координаты и температуры приведем математическую постановку обратной стационарной задачи теплопроводности для прямоугольного параллелепипеда (2.1 – 2.8) к безразмерной форме. В качестве нового масштаба координат примем длину грани LZ, а для масштаба температуры величину падающего теплового потока $q_F A$.

Для определения масштаба температуры разделим обе части краевого условия (2.2) для верхней грани параллелепипеда на величину падающего теплового потока $q_F A$:

$$1 = -\frac{\lambda}{q_F A}\left(\frac{\partial T}{\partial Z}\right)_{Z=0} + \frac{\varepsilon\sigma}{q_F A}\cdot(T_{Z=0}^4 - T_{oc}^4),$$

$$1=-\left(\partial\left(\frac{T}{\dfrac{q_F A\cdot LZ}{\lambda}}\right)\Big/\partial\tilde{z}\right)_{\tilde{z}=0}+\frac{\varepsilon\sigma}{q_F A}\cdot(T_{Z=0}^4-T_{oc}^4),$$

где $\tilde{z}=\dfrac{Z}{LZ}$.

Таким образом, масштаб температуры определится как:

$$\tilde{T}=T\Big/\left(\frac{q_F A\cdot LZ}{\lambda}\right).$$

Следовательно:

$$1=-\left(\frac{\partial\tilde{T}}{\partial\tilde{z}}\right)_{\tilde{z}=0}+\frac{\varepsilon\sigma\cdot LZ\cdot q_F^3A^3}{\lambda^4}\cdot(\tilde{T}_{\tilde{z}=0}^4-\tilde{T}_{oc}^4).$$

Произведем замену:

$$\pi_1=\frac{\varepsilon\sigma\cdot LZ^4\cdot q_F^3A^3}{\lambda^4}.$$

Тогда:

$$\left(\frac{\partial\tilde{T}}{\partial\tilde{z}}\right)_{\tilde{z}=0}=\pi_1\cdot(\tilde{T}_{\tilde{z}=0}^4-\tilde{T}_{oc}^4)-1 \qquad (2.2')$$

Аналогичным образом приведем к безразмерному виду граничные условия (2.3 – 2.7):

$$-\left(\frac{\partial\tilde{T}}{\partial\tilde{z}}\right)_{\tilde{z}=1}=\pi_1\cdot(\tilde{T}_{\tilde{z}=1}^4-\tilde{T}_{oc}^4) \qquad (2.3')$$

$$\left(\frac{\partial\tilde{T}}{\partial\tilde{x}}\right)_{\pi_2=0}=\pi_1\cdot(\tilde{T}_{\tilde{x}=0}^4-\tilde{T}_{oc}^4) \qquad (2.4')$$

$$-\left(\frac{\partial\tilde{T}}{\partial\tilde{x}}\right)_{\pi_2}=\pi_1\cdot(\tilde{T}_{\pi_2}^4-\tilde{T}_{oc}^4) \qquad (2.5')$$

$$\left(\frac{\partial\tilde{T}}{\partial\tilde{y}}\right)_{\pi_3=0}=\pi_1\cdot(\tilde{T}_{\tilde{y}=0}^4-\tilde{T}_{oc}^4) \qquad (2.6')$$

$$-\left(\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{y}}\right)_{\pi_3} = \pi_1 \cdot (\tilde{T}^4_{\pi_3} - \tilde{T}^4_{oc}) \qquad (2.7')$$

где $\pi_2 = \dfrac{LX}{LZ}$, $\pi_3 = \dfrac{LY}{LZ}$.

Уравнение теплопроводности (2.1) в безразмерной форме примет вид:

$$\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{y}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{z}^2} = 0 \qquad (2.1')$$

Условие (2.8) в безразмерной форме примет вид:

$$\left| \pi_4 - \int_{\tilde{F}} \left[\tilde{T}^4_{\tilde{z}=1} - \tilde{T}^4_{oc} \right] \partial \tilde{F} \right| \to \min \qquad (2.8')$$

Где $\pi_4 = \dfrac{Q_{LZ} \lambda^4}{\varepsilon \sigma q_F^4 A^4 \cdot LZ^6}$, $\tilde{F} = \dfrac{F}{LZ^2}$.

Уравнение для расчета тепловых потоков (2.9 – 2.15) в безразмерной форме примут вид:

$$\pi_5 = \pi_2 \cdot \pi_3 \qquad (2.9')$$

где $\pi_5 = \dfrac{Q_{вх}}{Aq_F \cdot LZ^2}$.

$$\pi_6 = \sum_{k=1}^{k=nz} \sum_{j=1}^{j=ny} \varepsilon \cdot \sigma (\tilde{T}^4_{1,j,k} - \tilde{T}^4_{oc}) \cdot \Delta \tilde{y} \cdot \Delta \tilde{z} \qquad (2.10')$$

$$\pi_7 = \sum_{k=1}^{k=nz} \sum_{j=1}^{j=ny} (\tilde{T}^4_{nx,j,k} - \tilde{T}^4_{oc}) \cdot \Delta \tilde{y} \cdot \Delta \tilde{z} \qquad (2.11')$$

$$\pi_8 = \sum_{i=1}^{i=nx} \sum_{k=1}^{k=nz} (\tilde{T}^4_{i,1,k} - \tilde{T}^4_{oc}) \cdot \Delta \tilde{x} \cdot \Delta \tilde{z} \qquad (2.12')$$

$$\pi_9 = \sum_{i=1}^{i=nx} \sum_{k=1}^{k=nz} (\tilde{T}^4_{i,ny,k} - \tilde{T}^4_{oc}) \cdot \Delta \tilde{x} \cdot \Delta \tilde{z} \qquad (2.13')$$

$$\pi_{10} = \sum_{i=1}^{i=nx} \sum_{j=1}^{j=ny} (\tilde{T}^4_{i,j,1} - \tilde{T}^4_{oc}) \cdot \Delta \tilde{x} \cdot \Delta \tilde{y} \qquad (2.14')$$

$$\pi_{11} = \sum_{i=1}^{i=nx} \sum_{j=1}^{j=ny} (\tilde{T}^4_{i,j,nz} - \tilde{T}^4_{oc}) \cdot \Delta \tilde{x} \cdot \Delta \tilde{y} \qquad (15')$$

где $\pi_6 = \dfrac{Q_{x=0} \cdot \lambda^4}{\varepsilon\sigma q_F^4 A^4 \cdot LZ^6}$, $\pi_7 = \dfrac{Q_{LX} \cdot \lambda^4}{\varepsilon\sigma q_F^4 A^4 \cdot LZ^6}$, $\pi_8 = \dfrac{Q_{y=0} \cdot \lambda^4}{\varepsilon\sigma q_F^4 A^4 \cdot LZ^6}$,

$$\pi_9 = \frac{Q_{LY} \cdot \lambda^4}{\varepsilon\sigma q_F^4 A^4 \cdot LZ^6},\ \pi_{10} = \frac{Q_{z=0} \cdot \lambda^4}{\varepsilon\sigma q_F^4 A^4 \cdot LZ^6},\ \pi_{11} = \frac{Q_{LZ} \cdot \lambda^4}{\varepsilon\sigma q_F^4 A^4 \cdot LZ^6}.$$

2.5 Методика имитационного моделирования для отладки программы решения прямой коэффициентной задачи теплопроводности

Для определения оптимального метода решения поставленной задачи были проведены численные эксперименты при следующих значениях геометрических и физических параметров: коэффициент теплопроводности $\lambda = 2\, Вт/мК$; размеры тела $LX = LY = LZ = 0{,}01\ м$; коэффициент поглощения $A = 0{,}75$; степень черноты $\varepsilon = 0{,}75$; плотность падающего теплового потока $q_F = 10^5\, Вт/м^2$.

В таблице 1 приведены результаты расчета температур в равностоящих друг от друга точках вдоль линии, параллельной оси Z и проходящей через центр образца ($x = LX/2$ и $y = LY/2$), при различном числе узлов (N) и различных итерационных методах решения.

Таблица 1 – Результаты расчета температуры поля в центре образца по оси Z в зависимости от количества узлов

Метод решения	Число узлов, N	Значение температурного поля вдоль оси Z при X=LX/2 и Y=LY/2 в одни и тех же сеточных узлах				
Одновременное смещение	9	837,94	778,36	734,85	705,39	688,13
	13	837,86	778,25	734,72	705,27	688,05
	17	837,82	778,20	734,65	705,21	688,00
Последовательная верхняя релаксация	9	837,94	778,37	734,86	705,40	688,14
	13	837,85	778,26	734,73	705,28	688,06
	17	837,72	778,21	734,66	705,22	688,01

Как видно из таблицы 1, при применении различных методов решения разница в значениях температур в соответствующих узловых точках является не существенной.

В расчетах с использованием метода последовательной верхней релаксации предварительно определялось оптимальное значение $\omega_{опт}$. В таблице 2 и на рисунке 10 представлены результаты зависимости количества итераций, которые необходимы для решения поставленной задачи, от параметра релаксации ω и числа узлов N сеточной области.

Таблица 2 – Зависимость количества итераций от параметра релаксации и числа узлов сеточной области при $\lambda = 2\,Вт/мК$

Параметр релаксации	Кол–во итераций, n		
	Количество узлов, N		
	N = 9	N = 13	N = 17
1,6	388	748	1208
1,65	353	670	1072
1,7	321	597	943
1,75	290	528	823
1,8	261	463	708
1,85	233	401	600
1,9	207	343	498
1,95	181	287	401
2	158	234	308

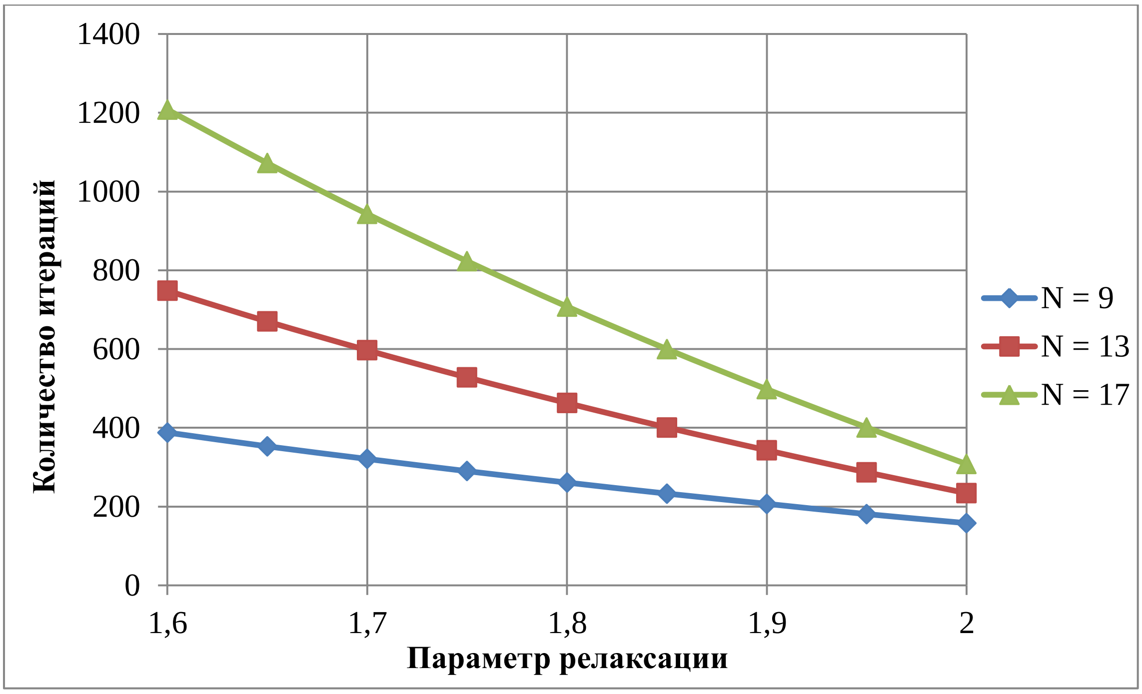

Рисунок 10 – Зависимость количества итераций от параметра релаксации и числа узлов сеточной области при $\lambda = 2\, Вт/ мК$

В таблице 3 приводится зависимость количества итераций (числитель) и времени расчета поставленной задачи на персональном компьютере (знаменатель) от выбранного метода расчета и числа узлов.

Таблица 3 – Зависимость количества итераций (числитель) и времени расчета задачи на ПК (знаменатель) от выбранного метода расчета и числа узлов.

Число узлов N	Метод расчета	
	Одновременных смещений	Последовательной верхней релаксации
9	1858/664мс	158/86мс
13	4059/3586мс	234/273мс
17	7155/12852мс	308/648мс

Полученные при решении прямой задачи результаты вычислительного эксперимента использовались для разработки алгоритма и составления программы решения обратной задачи теплопроводности.

При численном решении обратной задачи теплопроводности прямая задача решается многократно для различных значений коэффициента теплопроводности в заданном диапазоне с целью выполнения экстремального условия. Для быстрого уменьшения диапазона изменений коэффициента теплопроводности применялся метод одномерной оптимизации – метод дихотомии.

2.6 Методика имитационного моделирования для отладки программы решения обратной коэффициентной задачи теплопроводности

Чтобы произвести отладку программы решения обратной задачи теплопроводности, необходимо повторно решать прямую задачу теплопроводности. С этой целью решение прямой задачи производилось для трех разных по размерам образцов в форме прямоугольного параллелепипеда при четырёх различных значениях коэффициента теплопроводности. При проведении расчетов температура окружающей среды принималась равной $T_{oc} = 293K$, плотность падающего теплового потока $q_F = 10^5\ Вт/м^2$, а степень черноты и коэффициент поглощения принимались равными 0,75. Значение суммарного теплового потока с нижней поверхности образца было найдено в результате решения прямой задачи.

Если при постановке обратной задачи граничные условия остались неизменными и найдено значение суммарного теплового потока с нижней грани образца, то в результате решения обратной задачи получим численное значение коэффициента теплопроводности, соответствующее его значению, принятому при решении прямой задачи.

Полученные в ходе решения обратной задачи с использованием описанного выше алгоритма результаты приведены в таблице 4 – 6. В узловых точках исследуемого образца производился расчет температур до тех пор, пока абсолютная погрешность температуры в каждой точке не превышала 0,01 К и относительная разность поступающих в образец и выходящих из него интегральных тепловых потоков не превышала 0,1 %.

Как видно из таблиц 4 – 6, вычислительные погрешности при расчете коэффициента теплопроводности не превышают 0,6 %.

Таблица 4 – Результаты расчетного эксперимента для образца с размерами 5х5х5 мм

Параметры (5х5х5)	Значение КТ, заданное в прямой задаче, Вт/(мК)			
	0,5	1,5	3,0	5,0
Параметр релаксации	2	2	2	2
Расчетный тепловой поток с нижней грани образца, Вт	0,1440	0,2068	0,2314	0,2429
Интервал поиска КТ, Вт/(мК)	0,1 - 3	0,1 - 3	1 - 10	1 - 10
Расчетное значение КТ, Вт/(мК)	0,5006	1,5044	2,9984	4,9715
Относительная ошибка определения КТ, %	0,12	0,29	0,05	0,57
Количество итераций	868	854	1850	1749

Таблица 5 – Результаты расчетного эксперимента для образца с размерами 10х10х10 мм

Параметры (10х10х10)	Значение КТ, заданное в прямой задаче, Вт/(мК)			
	0,5	1,5	3,0	5,0
Параметр релаксации	2	2	2	2
Расчетный тепловой поток с нижней грани образца, Вт	0,4093	0,6798	0,8271	0,9043
Интервал поиска КТ, Вт/(мК)	0,1 - 3	0,1 - 3	1 - 10	1 - 10
Расчетное значение КТ, Вт/(мК)	0,5006	1,5044	2,9984	4,9715
Относительная ошибка определения КТ, %	0,12	0,29	0,05	0,57
Количество итераций	760	831	1144	733

Таблица 6 – Результаты расчетного эксперимента для образца с размерами 15х15х15 мм

Параметры (15х15х15)	Значение КТ, заданное в прямой задаче, Вт/(мК)			
	0,5	1,5	3,0	5,0
Параметр релаксации	2	2	2	2
Расчетный тепловой поток с нижней грани образца, Вт	0,6699	1,2961	1,6797	1,9016
Интервал поиска КТ, Вт/(мК)	0,1 - 3	0,1 - 3	1 - 10	1 - 10
Расчетное значение КТ, Вт/(мК)	0,5006	1,5044	2,9984	4,9715
Относительная ошибка определения КТ, %	0,12	0,29	0,05	0,57
Количество итераций	464	542	972	914

2.7 Имитационное моделирование программы решения прямой коэффициентной задачи теплопроводности в безразмерном виде

С целью оценки геометрических размеров образца и физических параметров эксперимента Q_{LZ}, q_F, необходимых для определения коэффициента теплопроводности в предполагаемом диапазоне его значений, проводилось имитационное моделирование программы решения прямой коэффициентной задачи теплопроводности в безразмерном виде.

На рисунках 11 – 14 представлена связь между безразмерными критериями $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4$. Из графиков видно, что значение π_1 должно лежать в интервале 0,001 – 0,01 при относительных размерах образца соответствующих диапазону $\pi_2 = \pi_3$ от 1 до 10. В этом случае перепады температур в образце не будут превышать 100 К, следовательно, можно использовать математическую модель (2.1' – 2.8') в которой не учитывается температурная зависимость коэффициента теплопроводности от температуры.

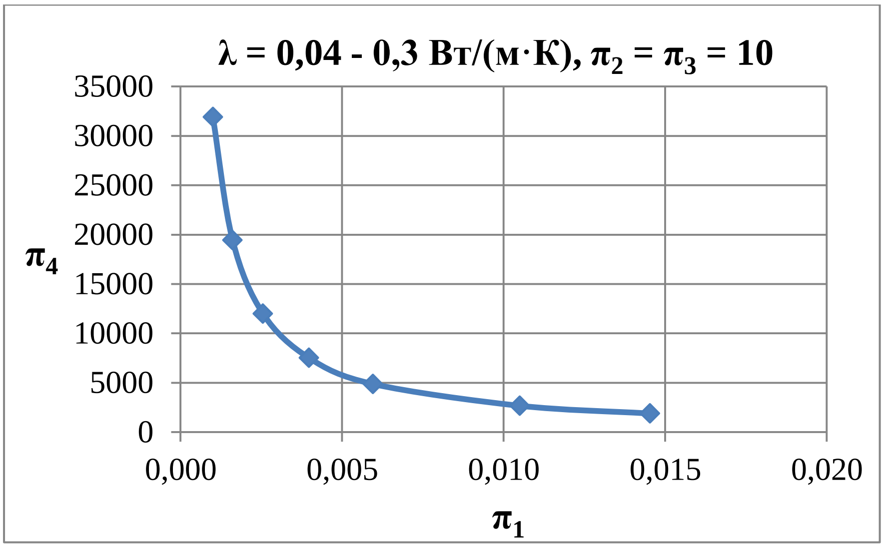

Рисунок 11 – Зависимость безразмерного параметра π_4 от π_1

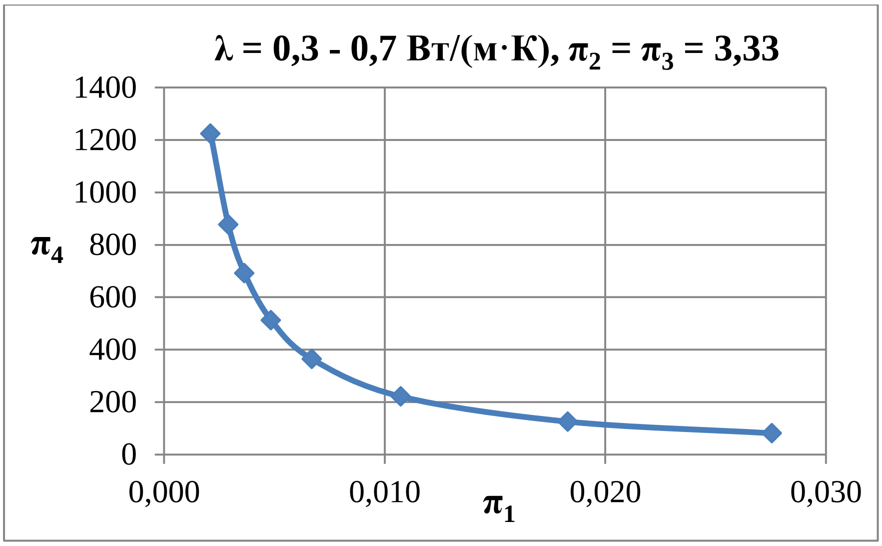

Рисунок 12 – Зависимость безразмерного параметра π_4 от π_1

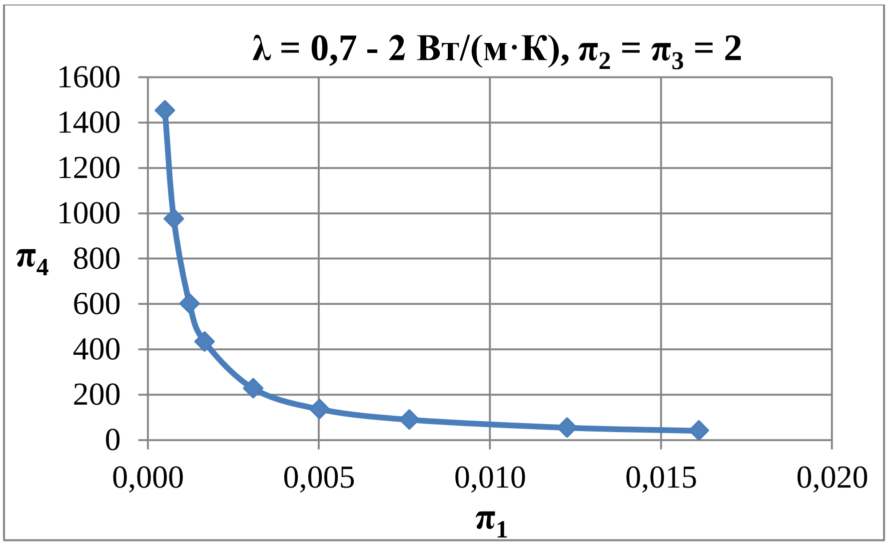

Рисунок 13 – Зависимость безразмерного параметра π_4 от π_1

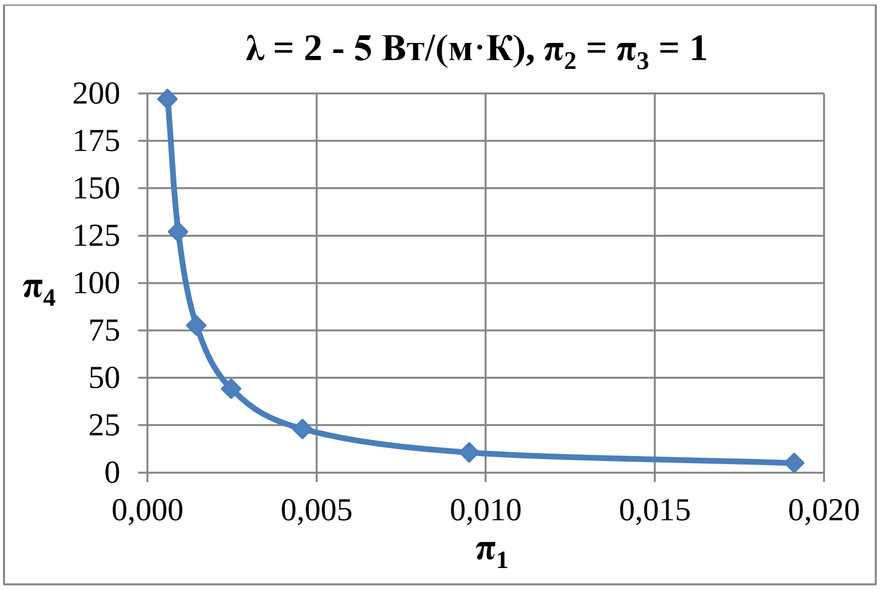

Рисунок 14 – Зависимость безразмерного параметра π_4 от π_1

3 Датчик Гардона

Радиометр, созданный Гардоном, выполнен в виде массивного медного блока 2 с круглым отверстием в центре. Отверстие закрыто тонкой пластинкой из константановой фольги 1, которая припаяна по периферии к блоку. Воспринимаемая при облучении фольгой энергия радиально растекается к медному блоку и частично излучается в окружающую среду.

Из константановой пластинки и тонкой медной проволочкой 3, которая припаяна с обратной стороны к центру пластинки, образован горячий спай.

Стационарное состояние в такой системе наступает достаточно быстрой, поскольку размеры константановой пластинки значительно меньше размера «холодильника».

На рисунке 15 показано распределение температуры на поверхности приемника.

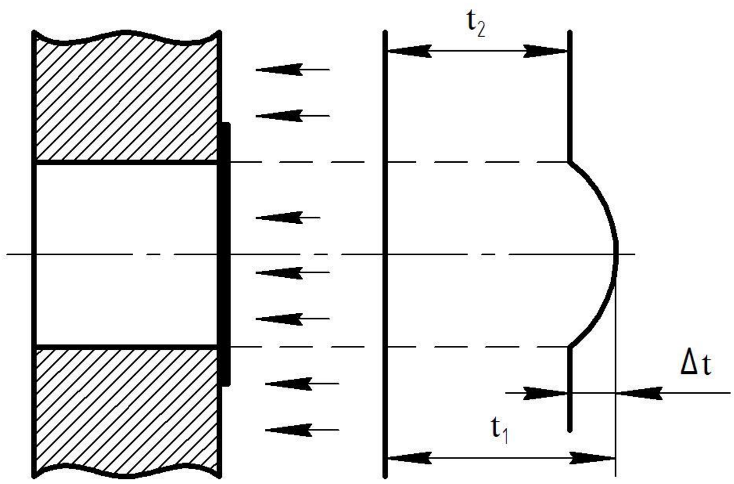

Рисунок 15 – Схема распределения температур по поверхности приемника радиометра с круглой фольгой [13]

Центру фольги соответствует максимальная t_1, а температуре холодильника минимальная температура t_2.

Медной проволока, константановая фольга и медный блок составляют дифференциальную термопару, с помощью которой измеряется разность температур $\Delta t = t_1 - t_2$. По величине перепада температур судят об интенсивности падающей энергии. Гардону удалось вывести зависимость между энергией лучистого потока q, разностью температур центра и периферии пластинки Δt и размерами пластинки – радиусом R и толщиной δ исходя из некоторых допущений (отсутствие конвективных потерь тепла от фольги, кондуктивных потерь через центральную медную проволочку, радиационных потерь от датчика; расположение медной проволоки строго по центру и т.д.).

В медно – константановом приемнике температурная зависимость теплопроводности константана примерно компенсируется температурной зависимостью термо – э. д. с. пары медь – константан. Это факт позволил Гардону вывести уравнение для чувствительности прибора Z.

$$Z = \frac{e}{q} = a \cdot \frac{R^2}{\delta},$$

где e – сигнала датчика; q – удельный тепловой поток; a – постоянная.

Инерционность датчика с круглым приемником зависит от его площади и связывается с ней упрощенной зависимостью

$$\tau = a_1 R^2 .$$

Радиометры различной чувствительности и различной инерционности можно получить, если изменять размеры пластинки.

Радиометры с круглой фольгой подойдут для измерений лучистых потоков с интенсивностью $(4-400)\cdot 10^4\ Вт/м^2$.

Чтобы не размягчался припой, рабочая температура (t_1) таких радиометров не должна превышать $185°C$. Чтобы расширить диапазон рабочих температур прибора можно паять константановую фольгу серебряными припоями. Однако, это приведет к нарушению линейной зависимости между падающими потоками и сигналом. Следовательно, целесообразнее увеличивать толщину фольги для повышения верхнего предела измерений.

Тепло, которое теряется пластинкой в окружающую среду значительно меньше того количества тепла, которое перетекает к холодильнику. Следовательно, радиометр такого типа не нуждается в откачке воздуха. Поглощение падающей энергии медным блоком при кратковременном использовании прибора не оказывает влияния на его работу. Все же рекомендуется изготавливать полированный экран с отверстием диаметром, немного превышающим эффективный диаметр фольги. Это поможет снизить рост температуры блока и послужит дополнительной защитой фольги от механических повреждений.

Охлаждение медного блока радиометра целесообразно применять при при длительных измерениях, а так же в условиях высоких температур и больших тепловых потоков. Для измерения лучистой энергии малой интенсивности возможно применение неохлаждаемых радиометров.

3.1 Математическая постановка задачи и расчет дискового радиометра в стационарном режиме

Поверхность датчика Гардона, воспринимающая тепловой поток, имеет форму диска. Математическая постановка стационарной задачи теплопроводности включает уравнение теплопроводности (3.1) и линейные граничные условия (3.2 – 3.3) [9]:

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dT}{dr}\right)+\frac{Aq_F}{\lambda\delta}=0, \tag{3.1}$$

$$r=0,\ \frac{dT}{dr}=0, \tag{3.2}$$

$$r=R_*,\ T=T_0. \tag{3.3}$$

где R_* - радиус диска; T - температура диска; T_0 - температура диска на радиусе R_*; δ - толщина диска; q_F - плотность подающего теплового потока; λ_0 - коэффициент теплопроводности;

Преобразуем уравнение (3.1) умножив обе его части на rdr:

$$d\left(r\frac{dT}{dr}\right)+=-\frac{Aq_F}{\lambda_0\delta}rdr$$

После интегрирования получим:

$$r\frac{dT}{dr}=-\frac{Aq_F}{\lambda_0\delta}\frac{r^2}{2}+C_1 \tag{3.4}$$

Преобразуем уравнение (3.4) умножив обе его части на $\frac{dr}{r}$:

$$dT=-\frac{Aq_F}{2\lambda_0\delta}rdr+C_1\frac{dr}{r}$$

После интегрирования получим:

$$T(r)=-\frac{Aq_F r^2}{4\lambda_0\delta}+C_1\ln r+C_2 \tag{3.5}$$

Подставив граничные условия (3.2), (3.3) в уравнения (3.4), (3.5) получим:

$$C_1 = 0,$$

$$C_2 = T_0 + \frac{Aq_F R_*^2}{4\lambda_0 \delta}.$$

Подставив полученные константы C_1 и C_2 в уравнение (3.5) получим:

$$T = T_0 + \frac{Aq_F R_*^2}{4\lambda_0 \delta}\left[1 - \left(\frac{r}{R_*}\right)^2\right] \tag{3.6}$$

Полученное уравнение (3.6) будет использоваться для определения падающего теплового потока на датчик Гардона. Поэтому, допуская что $r = 0,\ T = T_Ц$, получим:

$$q_F = \frac{4\lambda_0 \delta}{AR_*^2}\left(T_Ц - T_0\right),$$

где $T_Ц$ - температура в центре диска.

3.2 Математическая постановка задачи и расчет дискового радиометра в нестационарном режиме

Рассмотрим тонкий диск толщиной δ и радиусом R_* (рис. 16). На диск падает поток излучения постоянной плотности q_F. Поглощательная способность зачерненной поверхности диска - A. Поскольку диск тонкий и хорошо теплопроводный, то температура по толщине диска принята одинаковой, т.е. $T = T(r,\tau)$, где r - текущий радиус. Избыточная температура на краю диска $T(R_*,\tau) - T_0 = 0$ (где T_0 - температура корпуса и окружающей среды).

Уравнение энергии для тонкого диска имеет вид [10]:

$$\delta \frac{\partial}{\partial r}\left[\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial r}\right] + \delta \frac{1}{r}\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial r} + Aq_F = \delta \gamma c \frac{\partial T}{\partial \tau}, \tag{3.7}$$

где c - теплоёмкость диска, γ - удельный вес материала диска, λ_0 - коэффициент теплопроводности.

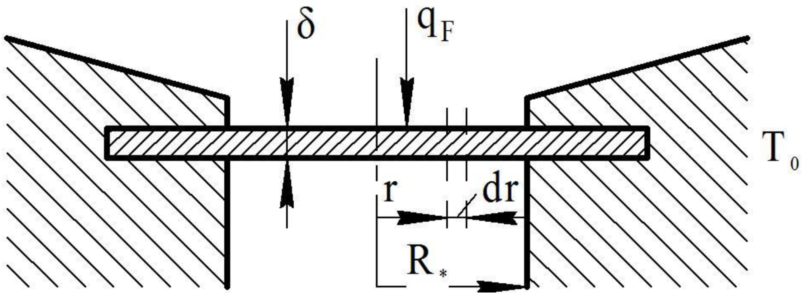

Рисунок 16 – Схема задачи

Введем безразмерные величины: $r/R_* \equiv \tilde{r}$ - радиус, $Fo \equiv \lambda_0 \tau / \gamma c R_*^2$ - число Фурье, $Ki_n \equiv A q_F R_*^2 / \delta \lambda_0 T_0$ - число падающего потока излучения, или критерий Кирпичева, $\vartheta \equiv (T - T_0)/T_0$ - безразмерная температура.

Используя эти безразмерные величины, уравнение (3.7) преобразуем к виду:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \tilde{r}^2} + \frac{1}{\tilde{r}} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tilde{r}} + Ki = \frac{\partial \vartheta}{\partial Fo} \qquad (3.7')$$

Краевые условия задачи, т.е. начальные и граничные условия имеют вид:

$$\tau = 0,\ T = T_0;$$
$$r = 0,\ \frac{dT}{dr} = 0;$$
$$r = R_*,\ T = T_0.$$

или, в безразмерной форме:

$$Fo = 0,\ \vartheta(\tilde{r}, 0) = 0;$$
$$\tilde{r} = 0,\ \frac{\partial \vartheta(0, Fo)}{\partial \tilde{r}} = 0;$$
$$\tilde{r} = 1,\ \vartheta(1, Fo) = 0.$$

Уравнение (3.7') решено методом Фурье – разделения переменных.

Функцию безразмерной температуры $\vartheta(\tilde{r}, Fo)$ можно представить в виде:

$$\vartheta(\tilde{r}, Fo) = \vartheta_C(\tilde{r}) + \vartheta_H(\tilde{r}, Fo) \qquad (3.8)$$

Тогда уравнение (3.7') можно записать в виде:

$$\frac{\partial^2\left(\vartheta_C+\vartheta_H\right)}{\partial\tilde{r}^2}+\frac{1}{\tilde{r}}\frac{\partial\left(\vartheta_C+\vartheta_H\right)}{\partial\tilde{r}}+Ki=\frac{\partial\left(\vartheta_C+\vartheta_H\right)}{\partial Fo},$$

$$\frac{\partial^2\vartheta_C}{\partial\tilde{r}^2}+\frac{\partial^2\vartheta_H}{\partial\tilde{r}^2}+\frac{1}{\tilde{r}}\left(\frac{\partial\vartheta_C}{\partial\tilde{r}}+\frac{\partial\vartheta_H}{\partial\tilde{r}}\right)+Ki=\frac{\partial\vartheta_C}{\partial Fo}+\frac{\partial\vartheta_H}{\partial Fo}.$$

Полученную сумму разделим на две составляющие:

1) $\frac{\partial^2\vartheta_C}{\partial\tilde{r}^2}+\frac{1}{\tilde{r}}\frac{\partial\vartheta_C}{\partial\tilde{r}}+Ki=0$

Граничные условия в данном случае имеют вид:

$\tilde{r}=0,\ \frac{\partial\vartheta_C(0)}{\partial\tilde{r}}=0;$

$\tilde{r}=1,\ \vartheta_C(1)=0.$

Поскольку ϑ_C зависит только от координат и не зависит от времени, то решением данного уравнения является полученное ранее в пункте 3.1 уравнение (3.6):

$$T=T_0+\frac{Aq_F R_*^2}{4\lambda_0\delta}\left[1-\left(\frac{r}{R_*}\right)^2\right]$$

или в безразмерном виде:

$$\vartheta_C=\frac{Ki}{4}\left(1-\tilde{r}^2\right) \tag{3.9}$$

2) $\frac{\partial^2\vartheta_H}{\partial\tilde{r}^2}+\frac{1}{\tilde{r}}\frac{\partial\vartheta_H}{\partial\tilde{r}}=\frac{\partial\vartheta_H}{\partial Fo}$ (3.10)

Начальные и граничные условия в данном случае имеют вид:

$Fo=0,\ \vartheta_H(\tilde{r},0)=-\vartheta_C(\tilde{r});$

$\tilde{r}=0,\ \frac{\partial\vartheta_H(0,Fo)}{\partial\tilde{r}}=0;$

$\tilde{r}=1,\ \vartheta_H(1,Fo)=0.$

Функцию безразмерной температуры $\vartheta_H(\tilde{r}, Fo)$ можно представить в виде:

$$\vartheta_H(\tilde{r}, Fo) = R(\tilde{r}) \cdot \theta(Fo) \tag{3.11}$$

Тогда уравнение (3.10) можно переписать в виде:

$$\theta R'' + \frac{1}{\tilde{r}}\theta R' = R\theta'$$

Умножим обе части уравнения на $\frac{1}{R\theta}$:

$$\frac{\theta'}{\theta} = \frac{R'' + \frac{1}{\tilde{r}}R'}{R} = -k^2.$$

$$\begin{cases} \theta' = -k^2\theta, \\ R'' + \frac{1}{\tilde{r}}R' + k^2R = 0. \end{cases}$$

где k - некоторая постоянная, которая определяется из граничных условий [11, с. 46].

Интегрирование уравнения $\theta' = -k^2\theta$ даст значение функции $\theta(Fo)$:

$$\frac{d\theta}{dFo} = -k^2\theta,$$

$$\int \frac{d\theta}{\theta} = \int -k^2 dFo,$$

$$\ln\theta = -k^2 Fo + \ln C,$$

$$\theta = Ce^{-k^2 Fo}.$$

Уравнение $R'' + \frac{1}{\tilde{r}}R' + k^2R = 0$ можно переписать в виде:

$$\tilde{r}R'' + R' + k^2\tilde{r}R = 0 \tag{3.12}$$

Полученное уравнение (3.12) является уравнением Бесселя.

Значением функции $R(\tilde{r})$ является решение уравнения Бесселя [11, с.118]:

$$R(\tilde{r}) = CJ_0(k\tilde{r}) + DY_0(k\tilde{r}) \tag{3.13}$$

где C и D – произвольные постоянные.

Так как температура на оси цилиндра ($\tilde{r} = 0$) должна быть конечной, то решение (3.13) не может содержать бесселеву функцию второго рода, которая стремится к бесконечности при $\tilde{r} \to 0$. Следовательно, из физических условий задачи постоянная должна быть равна нулю ($D = 0$) [11, с.118].

Тогда уравнение (3.11) можно переписать в виде:

$$\vartheta_H(\tilde{r}, Fo) = CJ_0(k\tilde{r}) \cdot e^{-k^2 Fo} \tag{3.14}$$

Найдем постоянные k и C из граничных условий.

Согласно граничному условию ($\tilde{r} = 1,\ \vartheta_H(1, Fo) = 0$) уравнение (3.14) примет вид:

$$\vartheta_H(Fo) = CJ_0(k) \cdot e^{-k^2 Fo} = 0$$

В таком случае должно иметь место равенство:

$$J_0(k) = 0 \tag{3.15}$$

Это равенство называется характеристическим уравнением, из него определяются характеристические числа k_n [11, с.119].

Таким образом, из характеристического уравнения следует:

$$k_n = \mu_n$$

Значит, имеем бесчисленное множество частных решений:

$$\vartheta_{Hn}(\tilde{r}, Fo) = C_n J_0(k_n \tilde{r}) \cdot e^{-k_n^2 Fo}$$

Такие функции называются фундаментальными функциями, ряд составленный из них, будет общим решением:

$$\vartheta_H(\tilde{r}, Fo) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n J_0(k_n \tilde{r}) \cdot e^{-k_n^2 Fo}$$

Для определения постоянных C_n воспользуемся начальным условием ($Fo = 0,\ \vartheta_H(\tilde{r}, 0) = -\vartheta_C(\tilde{r})$):

$$-\vartheta_C(\tilde{r}) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n J_0(k_n \tilde{r}),$$

$$-\frac{Ki}{4}\left(1-\tilde{r}^2\right)=\sum_{n=1}^{\infty}C_n J_0(k_n\tilde{r}). \tag{3.16}$$

Умножим обе части равенства (3.16) на $\tilde{r}J_0(k_m\tilde{r})dr$, где $k_m\tilde{r}$ - корни функции $J_0(k_m\tilde{r})$, и интегрируем в пределах от 0 до 1:

$$-\frac{Ki}{4}\int_0^1\tilde{r}\left(1-\tilde{r}^2\right)J_0(k_m\tilde{r})d\tilde{r}=\sum_{n=1}^{\infty}C_n\int_0^1\tilde{r}J_0(k_n\tilde{r})J_0(k_m\tilde{r})d\tilde{r} \tag{3.17}$$

Все интегралы в правой части равенства (3.17) равны нулю за исключением одного, когда $m=n$ [11, с.121]:

$$\int_0^1\tilde{r}J_0(k_n\tilde{r})d\tilde{r}J_0(k_m\tilde{r})d\tilde{r}=0$$

Для случая $m=n$ имеем [11, с.121]:

$$\int_0^1\tilde{r}J_0^2(k_n\tilde{r})d\tilde{r}=\frac{\tilde{r}^2}{2}\left[J_0^2(k_n\tilde{r})+J_1^2(k_n\tilde{r})\right]\Bigg|_0^1=\frac{1}{2}J_1^2(k_n)$$

Таким образом:

$$C_n=-\frac{\frac{Ki}{4}\int_0^1\tilde{r}\left(1-\tilde{r}^2\right)J_0(k_n\tilde{r})d\tilde{r}}{\frac{1}{2}J_1^2(k_n)}$$

Возьмем интеграл $\int_0^1\tilde{r}\left(1-\tilde{r}^2\right)J_0(k_m\tilde{r})d\tilde{r}$ разделив его на две части:

1) $\int_0^1\tilde{r}J_0(k_n\tilde{r})d\tilde{r}=\frac{1}{k_n}\tilde{r}J_1(k_n\tilde{r})\Big|_0^1=\frac{1}{k_n}J_1(k_n)$ [12]

2) Второй интеграл запишется в виде $-\int_0^1\tilde{r}^2\cdot\tilde{r}J_0(k_n\tilde{r})d\tilde{r}$. После интегрирования по частям и согласно свойствам из [12] получим:

$$-\int_0^1\tilde{r}^2\cdot\tilde{r}J_0(k_n\tilde{r})d\tilde{r}=\frac{2}{k_n^2}J_2(k_n)-\frac{1}{k_n}J_1(k_n)$$

Следовательно:

$$C_n = -\frac{Ki \cdot J_2(k_n)}{k_n^2 J_1^2(k_n)}$$

Тогда выражение (3.15) можно переписать в виде:

$$\vartheta_H(\tilde{r}, Fo) = \sum_{n=1}^{\infty} -\frac{Ki \cdot J_2(k_n)}{k_n^2 J_1^2(k_n)} J_0(k_n \tilde{r}) \cdot \exp(-k_n^2 Fo) = -Ki \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_0(k_n \tilde{r}) \cdot \exp(-k_n^2 Fo)}{k_n^3 J_1(k_n)}$$

где $J_2(k_n) = \frac{2J_1(k_n)}{k_n} - J_0(k_n) = \frac{2J_1(k_n)}{k_n}$ - согласно равенству (3.15) и свойствам из [12].

Согласно полученным выражениям для $\vartheta_C(\tilde{r})$ и $\vartheta_H(\tilde{r}, Fo)$ перепишем уравнение (3.8). Окончательно получим следующее выражение:

$$\vartheta(\tilde{r}, Fo) = \frac{Ki}{4}\left(1 - \tilde{r}^2\right) - Ki \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_0(k_n \tilde{r}) \cdot \exp(-k_n^2 Fo)}{k_n^3 J_1(k_n)} \quad (3.18)$$

3.3 Определение параметров дискового радиометра в стационарном режиме

Расчет времени наступления стационарного режима и значений температур для центральной точки радиометра будем производить при следующих исходных данных: радиометр выполнен из фольги из нержавеющей стали $\lambda = 14,77 \frac{Вт}{м \cdot К}$ толщиной $\delta = 10^{-4} м$ и радиусом $R_* = 10^{-3} м$; величина плотности падающего теплового потока составляет $q_F = 10^5 \frac{Вт}{м^2}$; температура окружающей среды $T_o = 293 К$; коэффициент поглощения $A = 1$.

При $Fo \geq 0,5$ выражение (3.18) примет вид:

$$\vartheta(\tilde{r}, Fo) = \frac{Ki}{4}\left(1 - \tilde{r}^2\right) - Ki \frac{2J_0(k_1 \tilde{r}) \cdot \exp(-k_1^2 Fo)}{k_1^3 J_1(k_1)}$$

Для центральной точки:

$$\vartheta(0,Fo)=\frac{Ki}{4}-Ki\frac{2\exp(-k_1^2Fo)}{k_1^3J_1(k_1)} \qquad (3.19)$$

Определим значение безразмерной температуры в центре радиометра в стационарном режиме:

$$\vartheta(0,\infty)=\frac{Ki}{4}=\frac{A\cdot q_F\cdot R_*^2}{4\cdot\delta\cdot\lambda_0\cdot T_0}=\frac{10^5\cdot10^{-6}}{4\cdot10^{-4}\cdot14,77\cdot293}=0,058$$

Примем температуру $\vartheta(0,Fo)=0,99\cdot\vartheta(0,\infty)$ и рассчитаем время наступления стационарного режима, выразив из (3.19) значение безразмерного времени Fo:

$$Fo=-\frac{1}{k_1^2}\cdot\ln\left[\left(\frac{Ki}{4}-\vartheta\right)\cdot\frac{k_1^3J_1(k_1)}{2Ki}\right]=$$

$$=-\frac{1}{2,41^2}\cdot\ln\left[\left(0,058-0,99\cdot0,058\right)\cdot\frac{2,41^3\cdot0,52}{2\cdot0,232}\right]=0,81$$

где $k_1=2,41$; $J_1(k_1)=0,52$ [14].

Из полученного значения Fo выразим время, за которое устанавливается стационарный режим:

$$\tau=\frac{Fo\cdot\gamma cR_*^2}{\lambda_0}=\frac{0,81\cdot7900\cdot505\cdot10^{-6}}{14,77}=0,22c \qquad (3.20)$$

где $\gamma=7900\frac{кг}{м^3}$; $c=505\frac{Дж}{кг\cdot К}$ [15].

Из (3.20) следует, что для радиометра с параметрами, описанными выше, при падающей на него плотности теплового потока $q_F=10^5\frac{Вт}{м^2}$, стационарный режим наступает через $\tau=0,22c$. При этом перепад температур между центром и периферией составит $\Delta T\approx16,9K$.

Произведем аналогичные расчеты для радиометра с радиусом фольги из нержавеющей стали $R_*=10^{-3}м$; $R_*=1,5\cdot10^{-3}м$ и плотностью падающего теплового потока $q_F = 4 \cdot 10^4 \dfrac{Вт}{м^2}$; $q_F = 4 \cdot 10^5 \dfrac{Вт}{м^2}$. Полученные результаты сведем в таблицы 7 – 12.

Таблица 7 – $q_F = 4 \cdot 10^4\, Вт/м^2$; $R_* = 10^{-3}\, м$.

$\delta, м$	$\tau, с$	$\Delta T, °C$	$T_Ц, °C$
0,00001	0,22	67,7	87,7
0,00004	0,22	16,9	36,9
0,00007	0,22	9,7	29,7
0,00010	0,22	6,8	26,8

Таблица 8 – $q_F = 10^5\, Вт/м^2$; $R_* = 10^{-3}\, м$.

$\delta, м$	$\tau, с$	$\Delta T, °C$	$T_Ц, °C$
0,00001	0,22	169,3	189,3
0,00004	0,22	42,3	62,3
0,00007	0,22	24,2	44,2
0,00010	0,22	16,9	36,9

Таблица 9 – $q_F = 4 \cdot 10^5\, Вт/м^2$; $R_* = 10^{-3}\, м$.

$\delta, м$	$\tau, с$	$\Delta T, °C$	$T_Ц, °C$
0,00001	0,22	677,0	697,0
0,00004	0,22	169,3	189,3
0,00007	0,22	96,7	116,7
0,00010	0,22	67,7	87,7

Из таблиц 7 – 9 видно, что с уменьшением толщины фольги радиометра возрастает температура в центре приемника, а, следовательно, и перепад температур между центром и периферией. С увеличением плотности падающего теплового потока q_F рост температур проходит с большей интенсивностью. При этом время наступления стационарного режима остается постоянным.

Таблица 10 – $q_F = 4 \cdot 10^4 \, Вт/м^2$; $R_* = 1{,}5 \cdot 10^{-3} \, м$.

$\delta, м$	$\tau, с$	$\Delta T, °C$	$T_Ц, °C$
0,00001	0,49	152,3	172,3
0,00004	0,49	38,1	58,1
0,00007	0,49	21,8	41,8
0,00010	0,49	15,2	35,2

Таблица 11 – $q_F = 10^5 \, Вт/м^2$; $R_* = 1{,}5 \cdot 10^{-3} \, м$.

$\delta, м$	$\tau, с$	$\Delta T, °C$	$T_Ц, °C$
0,00001	0,49	380,8	400,8
0,00004	0,49	95,2	115,2
0,00007	0,49	54,4	74,4
0,00010	0,49	38,1	58,1

Таблица 12 – $q_F = 4 \cdot 10^5 \, Вт/м^2$; $R_* = 1{,}5 \cdot 10^{-3} \, м$.

$\delta, м$	$\tau, с$	$\Delta T, °C$	$T_Ц, °C$
0,00001	0,49	1523,4	1543,4
0,00004	0,49	380,8	400,8
0,00007	0,49	217,6	237,6
0,00010	0,49	152,3	172,3

Результаты, полученные в таблицах 10 – 12 позволяют сделать вывод о том, что увеличение радиуса приемника влечет за собой рост перепадов температур между центром приемника и периферией. Это можно использовать в случаях измерения тепловых потоков малой интенсивности. Так же увеличение радиуса влечет за собой увеличение времени наступления стационарного режима.

Для принятия решения о необходимости применения охлаждения корпуса дискового радиометра можно дать оценку изменению температуры холодильника после наступления стационарного режима. Рассчитаем, за какое время температура медного блока повысится на $1°C$ в предположении, что массивный медный блок не имеет распределения температур по координатам. Величину плотности падающего теплового потока примем равной $q_F = 10^4\ Вт/м^2$, толщину фольги из нержавеющей стали $\delta = 10^{-5}\ м$ и радиус $r = 1{,}5 \cdot 10^{-3}\ м$, медный блок цилиндрической формы с размерами $R = 0{,}02\ м$ и $h = 0{,}03\ м$ (рис. 17).

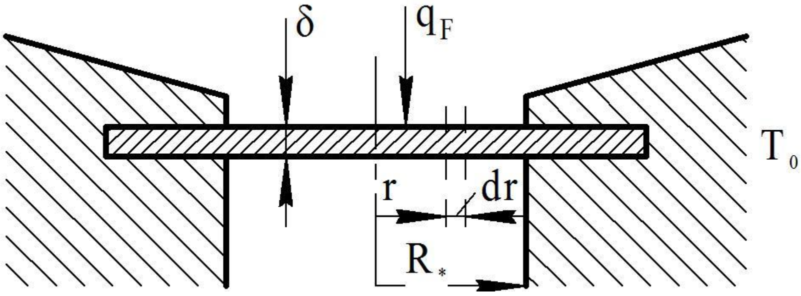

Рисунок 17 – Схема задачи

Уравнение теплового баланса при нагреве без учета потерь тепла имеет вид:

$$Q\Delta\tau = cm\Delta T \qquad (3.21)$$

Преобразуем уравнение (3.21) к следующему виду:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{Q}{cm}$$

$$\int dT = \int \frac{Q}{cm} d\tau$$

$$T(\tau) = \frac{Q}{cm}\tau + T_0$$

$$T(\tau) = \frac{q_F F}{c \cdot F \cdot h \cdot \rho}\tau + T_0 \qquad (3.22)$$

Тепловой поток в уравнении (3.22) представим в виде следующей суммы:

$$q_F F = q_{F1}F_1 + q_{F2}F_2$$

где $q_{F1}F_1$ – тепловой поток, падающий на поверхность радиометра, $q_{F2}F_2$ – тепловой поток, поступающий к медному блоку с торца фольги радиометра.

По закону сохранения энергии поток, уходящий с торца фольги радиометра равен падающему на нее тепловому потоку:

$$Q = q_{F1}F_{\Phi} = q_{F2}F_2$$

$$q_{F2} = \frac{q_{F1} \cdot F_{\Phi}}{F_2} = \frac{q_{F1} \cdot \pi r^2}{2\pi r \cdot \delta} = \frac{q_{F1} r}{2\delta} = \frac{10^4 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-5}} = 7,5 \cdot 10^5 \frac{Вт}{м^2}$$

Выразим из уравнения (3.22) искомое время:

$$T(\tau) = \frac{q_{F1}F_1 + q_{F2}F_2}{c \cdot F_1 \delta \cdot \rho} \tau + T_0$$

$$\tau = \frac{c \cdot \pi \left(R^2 - r^2\right) \cdot h \cdot \rho}{q_{F1} \cdot \pi \left(R^2 - r^2\right) + q_{F2} \cdot 2\pi r \cdot \delta} \cdot (T - T_0) =$$

$$= \frac{399 \cdot 3,14\left(0,02^2 - 0,0015^2\right) \cdot 0,03 \cdot 8960}{10^4 \cdot 3,14\left(0,02^2 - 0,0015^2\right) + 7,5 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,0015 \cdot 10^{-5}} = 10,7 с$$

где $c = 399 \frac{Дж}{кг \cdot К}$, $\rho = 8960 \frac{кг}{м^3}$ [15].

Полученный результат позволяет сделать вывод о том, что производить кратковременные измерения тепловых потоков малой интенсивности без применения охлаждения медного корпуса с достоверной точностью является возможным.

4 Принципиальная схема экспериментальной установки

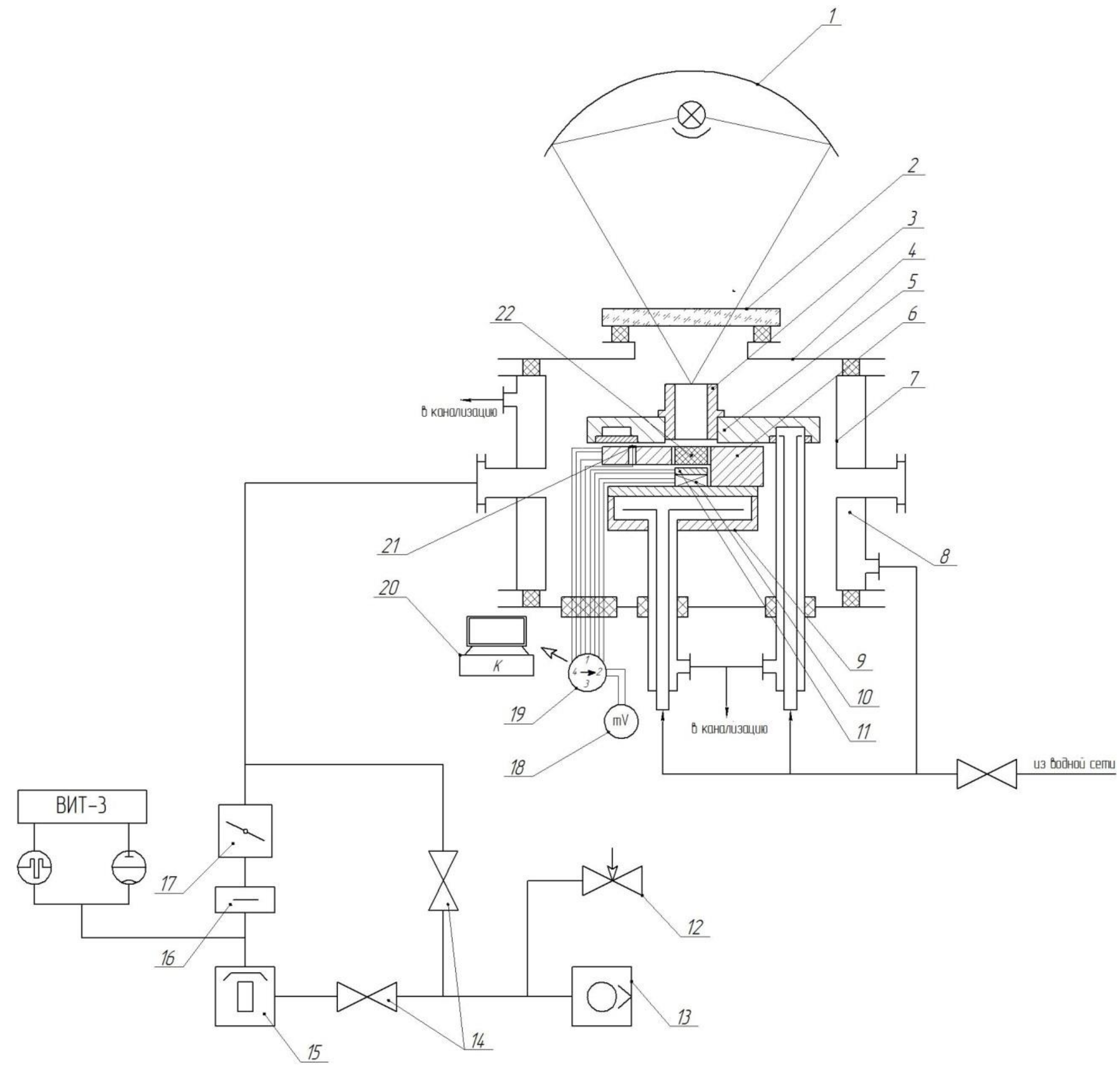

Рисунок 18 – Принципиальная схема установки

На рисунке 18 показана принципиальная схема установки для измерения коэффициента теплопроводности. Исследуемый образец 22 помещается внутрь вакуумной камеры 7, где закрепляется между двух массивных медных блоков 6 с помощью игольчатых держателей. Нагрев образца осуществляется с помощью оптической печи 1. Лучистый поток, проходя через кварцевое окно 2, попадает в зеркальный ящик 3. Зеркальный ящик закреплен на верхнем водоохлаждаемом основании 5 и служит для выравнивания лучистого теплового потока, падающего на верхнюю поверхность исследуемого образца. На нижнем водоохлаждаемом основании

9 находится градиентный датчик теплового потока 10, необходимый для определения плотности теплового потока, излучаемого образцом с его нижней грани. Плотность падающего на образец теплового потока измеряется датчиком Гардона 21. Нижнее основание измерительной ячейки может поворачиваться вокруг своей оси, что позволяет измерять датчиком Гардона распределение плотности падающего теплового потока. Охлаждение вакуумной камеры осуществляется за счет водяной рубашки 8, через которую протекает водопроводная вода. Сигналы с хромель – копелевых термопар, расположенных на медном диске 11 и медном блоке 6, а так же сигналы с датчиков теплового потока поступают на цифровой вольтметр 18 через четырехпозиционный переключатель 19. Полученные данные обрабатываются на ЭВМ – 20.

Механический пластинчато – роторный насос 13 служит для создания в вакуумной камере начального разряжения. Диффузионный насос 15 необходим для создания высокого вакуума в системе $\mathrm{P} \approx 10^{-2} - 10^{-5}$ Па. Прибор ВИТ – 3 служит для измерения вакуума в системе. Низкий вакуум измеряется с помощью термопарных преобразователей давления, высокий вакуум – ионизационных преобразователей давления. Предусмотрена байпасная линия для возможности замены образца в вакуумной камере без остановки диффузионного насоса. Для этого служат вентили 14 и вакуумный затвор 17. Замена образца без остановки диффузионного насоса позволяет значительно ускорить время проведения последующих экспериментов.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ4А	Яценко Константин Максимович

Институт	Энергетический	**Кафедра**	АТЭС
Уровень образования	Магистр	**Направление/ специальность**	Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения: *– вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)* *– опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)* *– негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)* *– чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)*	*Рабочее место исследователя включает в себя насосы, вакуумную камеру, установку радиационного нагрева. К возможным вредным факторам относят: вибрацию, шум от насосов, освещение. Есть возможность получить ожог и удар током. Негативное воздействие на окружающую среду не наносится.*
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	*ГОСТ 12.1.003-83,СН 2.2.4/2.1.8.566-96, СП 52.13330.2011 , СанПиН 2.2.4.548-96, СанПиН 2.2.4.723-96, ПУЭ, ГОСТ 12.1.019-79, "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности", ГОСТ 12.2.032-78.*
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности: *– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;* *– действие фактора на организм человека;* *– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);* *– предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)*	*Вибрация, при длительном ее воздействии, переходит в вибрационную болезнь, которая пагубно влияет на суставы и внутренние органы человека. Допустимые уровни вибрации приведены в документе СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Зашита – установка оборудования на виброгасящие подставки.* *Для того, чтобы не было возможности получить удар током, все части стенда под напряжением, заземляются.*
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности *– механические опасности (источники, средства защиты;* *– термические опасности (источники, средства защиты);* *– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);*	*Термические опасности: вакуумная камера, лампа ДКСР; использование водяного охлаждения по длине камеры, использование средств индивидуальной защиты.* *Электробезопасность: выпрямитель, насосы; заземление выше перечисленных устройств.* *Пожаровзрывобезопасность: наличие горючих материалов (дерево, масло); соблюдение правил пожарной безопасности, комплектование помещения огнетушителями.*

– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)	
3. Охрана окружающей среды: *– защита селитебной зоны* *– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);* *– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);* *– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);* *– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.*	*Воздействие на атмосферу и гидросферу отсутствуют.* *Твердые бытовые отходы, утилизируются на специальные полигоны.*
4. Защита в чрезвычайных ситуациях: *– перечень возможных ЧС на объекте;* *– выбор наиболее типичной ЧС;* *– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;* *– разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;* *– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий*	*Возможные ЧС:* *1. Возгорание насосов или выпрямителя*
Перечень графического материала:	
Эскизные графические материалы к расчётному заданию	*План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	21.12.2015

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности	Бородин Ю.В.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4А	Яценко К.М.		

5 Социальная ответственность

Целью раздела социальная ответственность является принятие проектных решений, исключающих несчастные случаи в производстве и снижение вредных воздействий на окружающую среду.

5.1 Анализ вредных и опасных факторов

5.1.1 Влияние шума на организм человека

Шум – сочетание беспорядочных по силе и частоте звуков.

Шум оказывает на организм человека неблагоприятное воздействие и может вызвать различного рода болезненные состояния, в том числе тугоухость и глухоту. Под влиянием шума учащаются пульс и дыхание, повышается расход энергии. Длительное воздействие шума оказывает вредное влияние на ЦНС и психику человека. В результате воздействия шума у человека появляются симптомы переутомления и истощения нервной системы. Со стороны психики наблюдается подавленное настроение, понижение внимания, задерживаются интеллектуальные процессы, повышается нервная возбудимость. Шум снижает работоспособность и производительность труда, препятствует нормальному отдыху и нарушает сон.

Согласно ГОСТ 12.1.003-83 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности» в помещениях лабораторий для проведения экспериментальных работ уровень шума не должен превышать 75 дБА.

Чтобы узнать соответствует ли уровень шума требованиям, проведем необходимые расчеты.

Основными источниками шума в лабораторной установке являются компрессор с ресивером для системы охлаждения и диффузионный масленый насос для создания вакуума, а также работа вытяжной вентиляции. Приведем их уровни шума в таблице 13.

Таблица 13 – Уровни шума комплектующих установки

№	Источник шума	Уровень шума, дБ
1	Компрессор	61
2	Насос	68
3	Вентиляция	40

Основной характеристикой звукового поля является уровень его звукового давления N. Оно вычисляется по формуле:

$$N = \frac{20 \lg p}{p_0},$$

где p – эффективное звуковое давление дин/см^2; $p_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ $Па$ – звуковое давление принятое за нулевой уровень.

Вычислим эффективное звуковое давление p_i:

$$p_i = 10^{\frac{N_i}{20}} \cdot p_0,$$

где N_i и p_i параметры i – го источника шума, а i=1, 2, … n.

Звуковое давление нескольких источников N суммируется по следующей формуле:

$$N = \frac{20 \lg (p_1 + p_2 + ... + p_n)}{p_0},$$

где N – суммарный уровень звукового давления; p_1, p_2, p_3 – эффективное звуковое давление для каждого значения N_1, N_2, N_n.

Таблица 14 – Уровни шума комплектующих установки

№	Источник шума	Уровень шума, дБ	Звуковое давление, Па
1	Компрессор	61	0,224
2	Насос	68	0,502
3	Вентиляция	40	0,020

Вычисляем общий уровень шума:

$$N = 20 \cdot \lg \frac{(0,02 + 0,502 + 0,224)}{2 \cdot 10^{-4}} = 71,43 \text{дБ}.$$

Делаем вывод о том, что расчетный уровень шума является допустимым.

Методы защиты от шума подразделяются на методы коллективной защиты и средства индивидуальной защиты.

К методам коллективной защиты относятся: снижение шума за счет совершенствования оборудования; изменения направления шума; применение звукоизоляции; рациональная планировка предприятий.

К методам индивидуальной защиты относятся средства индивидуальной защиты (специальные наушники, беруши).

5.1.2 Влияние вибрации на организм человека

Вибрация представляет собой механическое колебательное движение тех или иных поверхностей, простейшим примером которых является синусоидальное колебание.

Воздействие вибрации на человека вызывает нарушения физиологического и функционального состояния организма человека. Изменения в функциональном состоянии организма проявляются в нарушении вестибулярных реакций, нарушении координации движений, повышенной утомляемости, увеличении времени зрительной и двигательной реакции. Это приводит к понижению производительности. Проявление изменений в физиологическом состоянии организма заключается в нарушениях функций опорно – двигательного аппарата, нарушениях функций сердечнососудистой системы, развитии нервных заболеваний, нарушении функций органов внутренней секреции, поражении мышечных тканей и суставов. Как следствие, это приводит к возникновению вибрационной болезни.

Согласно СН 2.2.4/2.1.8.566-96 «Производственная вибрация в помещениях жилых и общественных зданий» проведем классификацию возникающих вибраций:

1. По способу передачи на человека: общая. Это связано с тем, что вибрация передается через опорные поверхности (пол, либо стол, на котором установлено оборудование) на стоящего или сидящего человека;

2. По источнику возникновения вибраций: общая третей категории тип В. Воздействие на человека происходит через рабочие места, не имеющие источников вибрации в помещении лаборатории. В данном случае источниками вибрации являются насосные агрегаты и электродвигатели;

3. По временным характеристикам: непостоянная. Насосные агрегаты и электродвигатели работают определенное время, которое необходимо для создания вакуума, либо для проведения эксперимента.

В таблице 15 представлены допустимые значения вибраций для рабочих мест 3 категории.

Таблица 15 – Предельно допустимые вибрации

Среднегеометрические частоты полос, Гц	Предельно допустимые значения по осям X, Y, Z							
	виброускорения				виброскорости			
	м/с^2		дБ		10^{-2}, м/с^2		дБ	
	1/3 окт	1/1 окт	1/3 окт	1/1 окт	1/3 окт	1/1 окт	1/3 окт	1/1 окт
1,6	0,0130		82		0,130		88	
2,0	0,0110	0,02	81	86	0,089	0,180	85	91
2,5	0,0100		80		0,063		82	
4,0	0,0079	0,014	78	83	0,032	0,063	76	82
5,0	0,0079		78		0,025		74	

8,0	0,0079	0,014	78	83	0,016	0,032	70	76
10,0	0,0100		80		0,016		70	
16,0	0,0160	0,028	84	89	0,016	0,028	70	75
20,0	0,0200		86		0,016		70	
40,0	0,0400		92		0,016		70	
63,0	0,0790	0,110	96	101	0,016	0,028	70	75
80,0	0,0630		98		0,016		70	

Защита от вибрации включает в себя организационные, технические и медико-профилактические мероприятия.

К организационным мероприятиям относится ограничение времени воздействия вибрации на человека.

К техническим мерам защиты относятся:

1. Снижение вибрации в источнике возникновения точной балансировкой вращающихся частей и изменением резонансной частоты системы при плановых ремонтах оборудования;
2. Виброизоляция – применение резиновых виброизоляторов при монтаже оборудования.

5.1.3 Освещение рабочего места

Рационально выполненное и правильно спроектированное освещение производственных помещений оказывает положительные психофизиологические воздействия на трудящихся, а так же благоприятно влияет на повышение эффективности и безопасности труда, способствует сохранению высокой работоспособности и снижению утомления и травматизма.

Недостаточность освещенности приводит к напряжению органов зрения, ослабляет внимание, что приводит к преждевременной утомляемости. Избыток освещенности вызывает ощущение рези в глазах и ослеплению. Неправильное направление света на рабочем месте дезориентирует рабочего.

Расчет освещенности рабочего места проводится посредством выбора системы освещения и определения достаточного количества светильников, а так же их размещения типа. Опираясь на это, можно рассчитать параметры искусственного освещения.

В СП 52.13330.2011 изложены основные требования и значения нормируемой освещённости рабочих поверхностей.

Таблица 16 – Нормы освещённости на рабочих местах производственных помещений при искусственном освещении

Характеристика зрительной работы	Наименьший размер объекта различения , мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Искусственное освещение		
						Освещенность, лк.		
						При системе комбинированного освещения		При системе общего освещения
						всего	в том числе от общего	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Высокой точности	0,30	III	б	сред-ний	сред-ний	1000	200	300

Наиболее часто в искусственном освещении применяется два вида электрических источников света: лампы накаливания и люминесцентные лампы.

Люминесцентные лампы по сравнению с лампами накаливания обладают рядом существенных преимуществ:

– по спектральному составу света близки к естественному дневному свету;
– имеют высокую светоотдачу, которая в 3 – 4 раза выше, чем у ламп накаливания;
– обладают более высоким КПД, который в 1,5 – 2 раза выше, чем КПД ламп накаливания;
– имеют более длительный срок службы.

По спектральному составу видимого света различают лампы белого цвета (ЛБ), холодного белого (ЛХБ), тёплого белого (ЛТБ), дневного света (ЛД), дневного света с улучшенной цветопередачей (ЛДЦ). Лампы типа ЛБ применяются наиболее часто. При повышенных требованиях к передаче цветности применяются лампы типов ЛХБ, ЛД, ЛДЦ. Для более натуральной цветопередачи человеческого лица применяется лампа типа ЛТБ.

Открытые двухламповые светильники типа ОД, ОДОР, ШОД, ОДО, ООД являются наиболее распространёнными типами светильников для люминесцентных ламп (допускаются при умеренной влажности и запылённости, для нормальных помещений с хорошим отражением потолка и стен).

Расположение светильников в помещении определяется следующими размерами:

$H = 3\ м$ – высота помещения;

$h_p = 0,75\ м$ – высота рабочей поверхности над полом;

$h = h_n - h_p = 2,8 - 0,75 = 2,05\ м$ – высота светильника над рабочей поверхностью.

$h_c = 0,2\ м$ – расстояние светильников от перекрытия (свес);

$h_n = H - h_c = 3 - 0,2 = 2,8\ м$ – высота светильника над полом, высота подвеса;

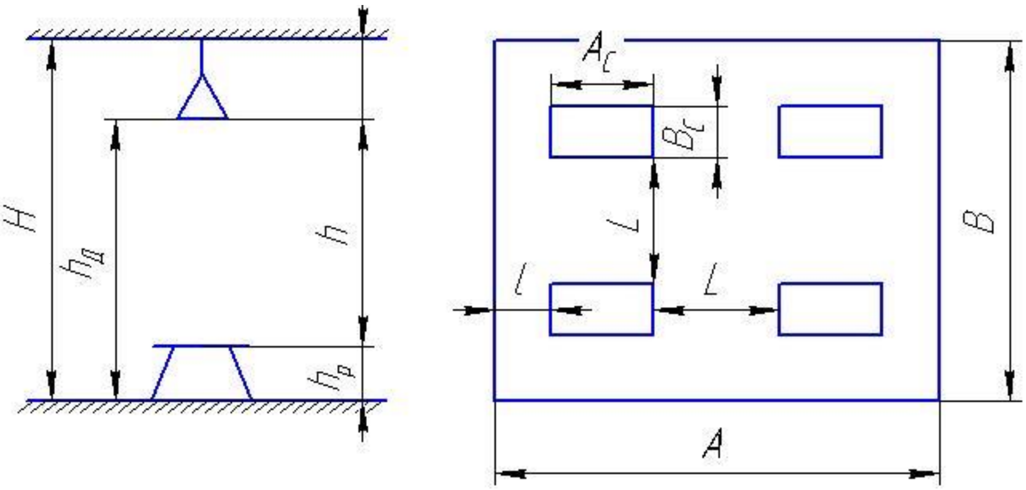

Рисунок 19 – Основные параметры для расчета освещения

Оптимальное расстояние от крайнего ряда светильников до стены рекомендуется принимать

$$l = \frac{L}{3}$$

При равномерном размещении люминесцентных светильников последние располагаются обычно рядами – параллельно рядам оборудования.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина $\lambda = \frac{L}{h}$. Уменьшение этого критерия приводит к удорожанию обустройства и обслуживания освещения, а чрезмерное увеличение ведёт к неравномерности освещённости.

Для светильников люминесцентными лампами без защитной решетки типов ОД, ОДО $\lambda = 1,4$.

Расстояние между светильниками L определяется как:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,05 = 2,87 \text{ } м;$$

Тогда расстояния от крайнего ряда до стены будет равно

$$l = \frac{L}{3} = \frac{2,87}{3} = 0,955 \text{ } м.$$

Расчет освещения производится для лаборатории длина которой – 8000 мм, ширина – 5000 мм.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока. Это коэффициент, который учитывает световой поток, отражённый от потолка и стен. Световой поток лампы накаливания или группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E_н \cdot S \cdot K \cdot Z}{N \cdot \eta},$$

где $E_н = 300\ лк$ – нормируемая минимальная освещённость по СП 52.13330.2011; $S = A \cdot B = 8 \cdot 5 = 40\ м^2$ – площадь освещаемого помещения; K – коэффициент запаса. Для помещения с малым выделением пыли $K = 1{,}5$. Z – коэффициент неравномерности освещения, отношение $E_{ср} / E_{min}$. Для люминесцентных ламп $Z = 1{,}1$;

N – число ламп. Примем $N = 8$;

η – коэффициент использования светового потока.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения i, типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен ρ_c и потолка $\rho_п$.

Для лаборатории: $\rho_c = 30\%$ – стены оклеены светлыми обоями; $\rho_п = 50\%$ – потолок чистый бетонный.

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{40}{2{,}05 \cdot (8 + 5)} = 1{,}5.$$

Коэффициента использования светового потока светильников $\eta = 52\%$.

Световой поток ламп в каждом из рядов:

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot K \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 40 \cdot 1{,}5 \cdot 1{,}1}{8 \cdot 0{,}55} = 4760\ люмен.$$

Выбираем светильник ОД – 2 – 80 с лампой ЛБ 80:

– Световой поток ламп – 5200 лм;

– Количество ламп – 2;

– Мощность – 80 Вт;

– Габариты светильника:

  - Длина – 1531 мм,
  - Ширина – 266 мм,
  - Высота – 198 мм.

Делаем проверку выполнения условия:

$$\frac{|\Phi_{станд} - \Phi_{расч}|}{\Phi_{расч}} \cdot 100\% \leq 10\%$$

$$\frac{|5200 - 4760|}{4760} \cdot 100\% = 8{,}46\% \leq 10\%$$ - условие выполняется.

Определяем электрическую мощность осветительной установки:

$$P = P_0 \cdot N = 80 \cdot 8 = 640 \ Вт.$$

Изобразим план размещения светильников на рисунке 20.

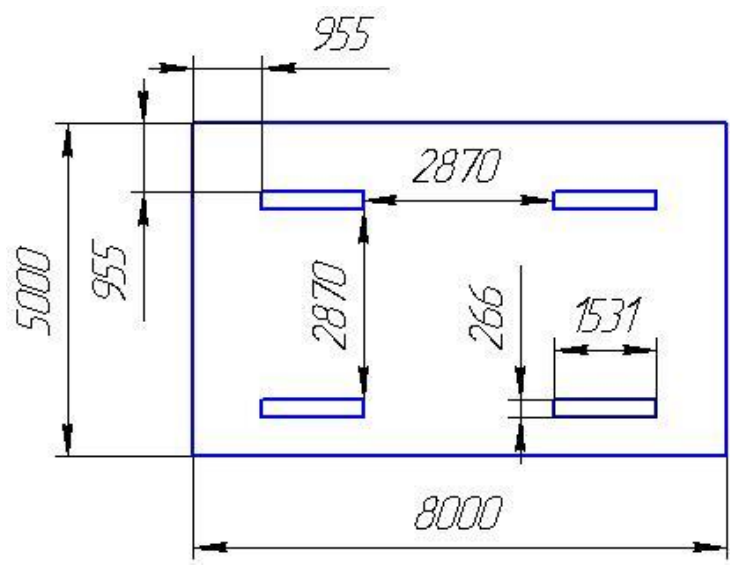

Рисунок 20 – Размещения светильников с люминесцентными лампами

5.1.4 Микроклимат помещения

Согласно СанПиН 2.2.4.548–96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений», для создания нормальных условий труда в производственных помещениях необходимо обеспечить в помещении оптимальные и допустимые микроклиматические условия.

Оптимальные микроклиматические условия – это группа количественных показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека способствуют сохранению нормального теплового состояния организма без напряжения механизмов терморегуляции. Они создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и обеспечивают ощущение теплового комфорта.

Допустимые микроклиматические условия – это группа количественных показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека вызывают непостоянные и быстро нормализующиеся изменения теплового состояния организма человека. Данный процесс сопровождающиеся напряжением механизмов терморегуляции не выходящих за пределы физиологических приспособительных возможностей. Повреждения или нарушения состояния здоровья при этом не возникает, но могут наблюдаться дискомфортные теплоощущения, понижение работоспособности и ухудшение самочувствия.

Допустимые микроклиматические условия допускаются в случае, если оптимальные не могут быть достигнуты.

К показателям микроклимата относятся:

– относительная влажность воздуха;
– интенсивность теплового излучения.
– скорость движения воздуха;
– температура воздуха;

Разграничение работ по категориям осуществляется на основе интенсивности общих энергозатрат организма в ккал/ч. Согласно СанПиН

2.2.4.548-96 работы лаборатории относится к категории II-а по уровню энергозатрат.

Приведем в таблице 17 оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений для категории работ II-а.

Таблица 17 – Оптимальные и допустимые показатели микроклимата производственных помещений

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
	Оптимальные значения			
Холодный	19-21	18-22	40-60	0,2
Теплый	20-22	19-23	40-60	0,2
	Допустимые значения			
Холодный	17-18,9	16-24	15-75	0,1
Теплый	18-19,9	17-28	15-75	0,1

Для людей на рабочих местах допустимые величины интенсивности теплового облучения от производственных источников, нагретых до темного свечения должны соответствовать значениям из таблицы 18.

Таблица 18 – Допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тела работающих от производственных источников

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, Вт/кв. м, не более
50 и более	35
25 - 50	70
не более 25	100

Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих от источников излучения, нагретых до белого и красного свечения (раскаленный или расплавленный металл, стекло, пламя и др.) не должны превышать 140 Вт/кв. м. При этом облучению не должно подвергаться более 25% поверхности тела и обязательным является использование средств индивидуальной защиты, в том числе средств защиты лица и глаз.

При наличии теплового облучения работающих, температура воздуха на рабочих местах категории II-а не должна превышать 22 °C.

Требуемое состояние микроклимата рабочей зоны может быть обеспечено при использовании:

- защиты от источников тепловых излучений для снижения температуры воздуха в помещении и теплового облучения работающих;
- устройство вентиляции и отопления;
- применение средств индивидуальной защиты.

5.1.5 Электромагнитное излучение

Электромагнитные поля не ощущаются человеком, однако они оказывают существенное влияние на работоспособность, так как электромагнитные поля обладают высокой биологической активностью.

Электромагнитная безопасность регулируется государственными стандартами и санитарными правилами и нормами. Согласно СанПиН 2.2.4.723–98 предельно допустимые уровни (ПДУ) электромагнитных полей, устанавливаются в зависимости от времени пребывания персонала для условий общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействия. Приведенные значения представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Предельно допустимые уровни ЭМП

Время пребывания (ч)	Допустимые уровни МП, H [А/м]/B [мкТл]	
	общем	локальном
1	1600/2000	6400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

Обеспечение защиты персонала от неблагоприятного влияния ЭМП организуется путем проведения технических и организационных мероприятий.

5.1.6 Механический фактор

Механическими опасностями называют такие нежелательные воздействия на человека, происхождение которых обусловлено силами гравитации или кинетической энергией тел.

В помещении лабораторной источниками механических опасностей являются:

- движущиеся части механизмов оборудования;
- неприкрепленное оборудование (материалы, инструменты и т.д.);
- острые углы столов;
- горячие поверхности установки.

Для защиты от механических опасностей рассматривают два основных метода:

- обеспечение недоступности к опасным частям оборудования;
- применение средств индивидуальной защиты (специальная обувь, перчатки, каски, защитные каски).

5.1.7 Электробезопасность

Требования электробезопасности изложены в Межотраслевых правилах по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок, правилах технической эксплуатации электроустановок потребителей, ГОСТах и других нормативных правовых актах.

Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей зависит от:

– пути тока через тело человека;
– рода и величины напряжения и тока;
– частоты электрического тока;
– продолжительности воздействия электрического тока или электромагнитного поля на организм человека;
– условий внешней среды.

Основные причины несчастных случаев от воздействия электрического тока:

– появление напряжения на отключенных токоведущих частях вследствие ошибочного включения установки, на которых работают люди;
– случайное приближение или прикосновение на опасное расстояние к токоведущим частям, находящимся под напряжением;
– появление напряжения на металлических конструктивных частях электрооборудования – кожухах, корпусах (в результате повреждения изоляции или других причин);

– возникновение шагового напряжения на поверхности земли в результате замыкания провода на землю.

По классификации по опасности поражения электрическим током в соответствии с «Правилами устройства электроустановок» помещение лаборатории относится ко второму классу – помещения с повышенной опасностью. Это связано с наличием следующих опасных факторов:

– токопроводящих полов (железобетонных);

– возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой.

Для безопасной работы на электроустановках выполняется ряд организационных мероприятий, которые прописаны в ГОСТ 12.1.019-79:

– к работе на электроустановках допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие инструктаж и обучение безопасным методам труда и не имеющие медицинских противопоказаний;

– назначение лиц, ответственных за организацию и производство работ;

– организация надзора за проведением работ, перерывы в работе.

Так же используются технические способы и средства обеспечения электробезопасности:

– изоляцию токоведущих частей;

– защитное заземление;

– защитное отключение.

Сила тока лабораторной установки регулируется в пределах от 0 до 300А, напряжение 45 В. Источник постоянного тока подключен к трехфазной сети с напряжением 380/220В – 50 Гц.

В связи с этим работа на данной установке требует третей группы допуска по электробезопасности.

5.2 Экологическая безопасность

Экологическая безопасность – это допустимый уровень негативного воздействия природных и антропогенных факторов экологической опасности на окружающую среду и человека. В нашем случае проектируемая установка не оказывает существенного воздействия на атмосферу и гидросферу земли. Твердые бытовые отходы утилизируются на специальные полигоны. Установку после окончания срока её эксплуатации возможно отправить на переработку.

5.3 Термический фактор и пожарная безопасность

Противопожарная защита имеет своей целью применение наиболее эффективных, экономически целесообразных и технически обоснованных способов и средств предупреждения пожаров, а так же их ликвидации с минимальным ущербом при наиболее рациональном использовании сил и технических средств тушения.

Согласно "Техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности" помещение лаборатории по взрывопожарной и пожарной опасности относится к категории В. Это связано с наличием горючих жидкостей и твердых материалов.

Для предотвращения возникновения пожара используются следующие меры:

1. Строительно-планировочные;
2. Технические;
3. Организационные.

Строительно – планировочные меры определяются огнестойкостью зданий и сооружений (выбор материалов конструкций: сгораемые, несгораемые, трудно сгораемые) и предел огнестойкости – это количество времени, в течение которого под воздействием огня не нарушается несущая способность строительных конструкций вплоть до появления первой трещины.

Технические меры – это соблюдение противопожарных норм при эвакуации, проектировании систем отопления, вентиляции, электрического обеспечения, освещения, а так же использование разнообразных защитных систем, соблюдение параметров режимов работы оборудования и технологических процессов.

Организационные меры – обучение персонала правилам пожарной безопасности, соблюдению мер по пожарной безопасности.

Использование средств пожаротушения. Выбор типа и необходимого количества огнетушителей в защищаемом помещении следует производить в зависимости от их огнетушащей способности, предельной площади, а также класса пожара горючих веществ и материалов. Исходя из этого и ориентируясь на "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" было решено использовать углекислотные огнетушители марки ОУ-5 в количестве двух штук.

5.4 Компоновка рабочей зоны

Главными атрибутами рабочего места исследователя являются: лабораторный стенд, состоящий из установки теплового излучения и вакуумного агрегата. После монтажа оборудования, работа преимущественно сидячая.

Для эффективного выполнения заданной задачи необходима организация рабочего места, которая в соответствии с ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ включает три направления: оснащение, обслуживание и планировку рабочих мест.

Оснащение рабочего – это система укомплектования рабочего места основным технологическим и вспомогательным оборудованием, технологической и организационной оснасткой в количестве, необходимом и достаточном для эффективного и качественного выполнения поставленной задачи.

Обслуживание рабочих мест – система регламентированного обеспечения рабочего места инструментом, предметами труда, электроэнергией и всеми видами услуг в количестве, необходимом и достаточном для поддержания непрерывности и заданной интенсивности процесса.

Планировка рабочего места – размещение оборудования, элементов оснастки, предметов труда и рабочего места с учетом оптимальных зон досягаемости при работе. Рациональная планировка рабочего места обеспечивает удобную рабочую позу, исключает ненужное перемещение и лишние движения, снижает утомляемость, а так же сокращает потери рабочего времени.

При организации рабочего места в лаборатории должны быть соблюдены следующие основные условия:

– достаточное рабочее пространство, позволяющее осуществлять все необходимые движения и перемещения;
– правильное естественное и искусственное освещение для выполнения поставленных задач;
– соблюдение нормированного микроклимата помещения;
– уровень акустического шума не должен превышать допустимого значения.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ4А	Яценко Константин Максимович

Институт	Энергетический	**Кафедра**	АТЭС
Уровень образования	Магистр	**Направление/ специальность**	Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих *2. Нормы и нормативы расходования ресурсов* *3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования*
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:
1. Формирование плана разработки научного исследования (НИ) *2. Составление бюджета научного исследования (НИ)* *3. Составление сметы затрат на проектируемую установку*
Перечень графического материала
1. Смета затрат на проект *2. Смета затрат на установку*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	21.12.2015

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель кафедры менеджмента	Кузьмина Н.Г.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4А	Яценко К.М.		

6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Перечень работ, необходимых для выполнения проекта, представлен в таблице 20. Каждый вид работы характеризуется продолжительностью выполнения и исполнительным лицом. Эти исходные данные позволяют рассчитать смету затрат на выполнение проекта.

Таблица 20 – Перечень работ и оценка времени их выполнения

№ п/п	Наименование работ	Количество исполнителей	Продолжитель-ность, дней
1	Получение задания	Инженер	1
2	Аналитический обзор современных методов определения теплофизических свойств материалов по литературным источникам	Инженер	14
3	Выбор метода и решение трехмерной задачи теплопроводности	Инженер	4
4	Составление программы решения трехмерной задачи теплопроводности в среде Pascal	Инженер	21
6	Отладка программы решения трехмерной задачи теплопроводности в среде Pascal	Инженер	7
7	Проведение имитационного моделирования	Инженер	7
8	Разработка чертежей установки для измерения теплопроводности	Инженер	14

Продолжение таблицы 20

№ п/п	Наименование работ	Количество исполнителей	Продолжительность, дней
9	Написание раздела “Социальная ответственность”	Инженер	10
10	Написание раздела “Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение”	Инженер	6
11	Заключение и выводы	Инженер	3
12	Оформление пояснительной записки ВКР	Инженер	5
13	Консультации	Научный руководитель	8
	Итого	Инженер	100
		Научный руководитель	8

Смета затрат на проект: $K_{ПР} = U_{МАТ} + U_{АМ} + U_{ЗП} + U_{СО} + U_{ПР} + U_{НАКЛ}$.

а) Материальные затраты $U_{МАТ} = 1000$ рублей.

б) Амортизация $U_{АМ} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot Ц_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}}$;

где $T_{исп.кт} = 47$ дней – время использования компьютерной техники (КТ).

$T_{кал} = 365$ дней – количество дней в году;

$Ц_{кт} = 30$ т. рублей – стоимость КТ;

$T_{сл} = 5$ лет – срок службы КТ.

Тогда $U_{АМ} = \frac{47}{365} \cdot 30 \cdot \frac{1}{5} = 0{,}8$ т. рублей.

в) Заработная плата $U_{ЗП}$

Инженер $U_{ЗП}^{МЕС} = ЗП_0 \cdot K_1 \cdot K_2$,

где $ЗП_0 = 14500$ рублей – месячный оклад инженера 10 разряда;

$K_1 = 1{,}1$ (10%) – коэффициент, учитывающий отпуск;

$K_2 = 1{,}3$ (30%) – районный коэффициент.

Тогда $U_{ЗП}^{МЕС} = 14{,}500 \cdot 1{,}1 \cdot 1{,}3 = 20{,}735$ т. рублей.

$$U_{ЗП}^{Ф} = \frac{U_{ЗП}^{МЕС}}{21} \cdot n = \frac{20{,}735}{21} \cdot 100 = 98{,}738 \text{ т. рублей,}$$

где n – количество отработанных дней по факту.

Научный руководитель $U_{ЗП}^{МЕС.НР} = (ЗП_0 \cdot K_1 + Д) \cdot K_2$,

где $ЗП_0 = 23300$ рублей – месячный оклад доцента;

$Д = 2200$ рублей – доплата за интенсивность труда.

Тогда $U_{ЗП}^{НР} = (23{,}300 \cdot 1{,}1 + 2{,}200) \cdot 1{,}3 = 36{,}179$ т. рублей.

$$U_{ЗП}^{Ф.НР} = \frac{U_{ЗП}^{МЕС.Ф}}{21} \cdot n = \frac{36{,}179}{21} \cdot 8 = 17{,}782 \text{ т. рублей.}$$

$$U_{ЗП} = Ф.ЗП = U_{ЗП}^{Ф} + U_{ЗП}^{Ф.НР} = 98{,}738 + 17{,}782 = 116{,}520 \text{ т. рублей.}$$

г) Социальные отчисления $U_{CO} = 0{,}3 \cdot Ф.ЗП = 0{,}3 \cdot 116{,}520 = 34{,}956$ т. рублей.

в) Прочие затраты $U_{ПР}$

$$U_{ПР} = 0{,}1 \cdot (U_{МАТ} + U_{АМ} + U_{ЗП} + U_{CO}) = 0{,}1 \cdot (1 + 0{,}8 + 116{,}520 + 34{,}956) =$$
$$= 15{,}328 \text{ т. рублей.}$$

е) Накладные расходы $U_{НАКЛ} = 200\ \% \cdot Ф.ЗП = 2 \cdot 116{,}520 = 233{,}040$ т. рублей.

Таблица 21 – Смета затрат на проект

Элементы затрат	Стоимость, рублей
Материальные затраты	1000
Амортизация	800

Продолжение таблицы 21

Заработная плата	116 520
Социальные отчисления	34 956
Прочие затраты	15 328
Накладные расходы	233 040
Итого	**401 644**

Разработанный проект предлагает неразрушающий стационарный метод измерения коэффициента теплопроводности, в котором используется решение трехмерной задачи теплопроводности при косвенном нагреве исследуемого образца с помощью оптической печи.

Программный продукт, созданный в процессе выполнения проекта и использовавшийся для математического моделирования тепловых процессов в исследуемом образце, позволяет обрабатывать данные, полученные в ходе экспериментов на реальной установке.

Основными элементами установки для измерения коэффициента теплопроводности являются: оптическая печь для лучистого нагрева образца, вакуумная камера, вакуумные насосы и измерительные приборы. В таблице 22 приведена смета на основное оборудование, входящее в состав экспериментальной установки по измерению коэффициента теплопроводности.

Таблица 22 – Смета затрат на установку

Наименование	Кол-во, шт	Цена, руб/шт	Стоимость, руб
Оптическая печь	1	200 000	200 000
Лампа ДКсР – 10000	1	28 000	28 000
Вакуумная камера	1	200 000	200 000
Прибор для измерения плотности тепловых потоков	1	100 000	100 000
Диффузионный вакуумный насос	1	150 000	150 000
Пластинчато – роторный вакуумный	1	40 000	40 000

Продолжение таблицы 22

Вакуумметр типа ВИТ – 19	1	70 000	70 000
Затвор вакуумной камеры	1	50 000	50 000
Прочее	-	-	150 000
Итого			**988 000**

Данная работа, выполненная в рамках магистерской диссертации, имеет единственную практически значимую цель – определение коэффициента теплопроводности различных материалов и не направлена на выполнение изысканий в сфере ресурсоэффективности и ресурсосбережения, поскольку в рамках измерений теплофизических величин нельзя говорить об универсальных методах измерения. Следовательно, главной задачей являлось дополнение предложенного метода измерения коэффициента теплопроводности к существующим, а не их замещение.

Заключение

При выполнении дипломной работы была изучена теория метода стационарной задачи теплопроводности для тела в форме прямоугольного параллелепипеда. На основании теории трехмерная стационарная коэффициентная обратная задача теплопроводности для прямоугольного параллелепипеда была решена в размерном и безразмерном виде.

В рамках данного дипломного проекта

1. Была разработана программа решения прямой и обратной задачи теплопроводности в среде Pascal.
2. Рассчитан датчик теплового потока (датчик Гардона) в стационарном и нестационарном режимах.
3. Рассмотрены следующие вопросы: производственная, пожарная и электробезопасность при выполнение работ на установке. Рассчитано освещение в лабораторном помещении и уровень шума при работе оборудования.

Список литературы

1. Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий / Анисимов М.В., Рекунов В.С. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т.326. №9. – с.15 – 22.
2. Измерение теплопроводности теплозащитных покрытий / Барабаш М.Ю., Белоусов И.В., Куницкая Л.Ю., Мартынчук Э.Л. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – Т.74. №5. – с.35 – 39.
3. Точное измерение сверхвысокого коэффициента теплопроводности материала на тонких пластинах / Миодушевский П.В., Бакмаев С.М-К., Тингаев Н.В. // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №5. – с.232.
4. Устройство для измерения теплопроводности полупроводников и их расплавов при высоких температурах / Магомедов Я.Б., Гаджиев Г.Г. // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 4. – с. 142 – 145.
5. Устройство для измерения теплопроводности / Гусейнов Г.Г. // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т.17. №23. – с. 299 – 304.
6. Заворин А. С., Кузьмин А. В., Раков Ю. Я. Методы определения теплопроводности конденсированных сред: учебное пособие. – Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск: Изд – во ТПУ, 2009. – 184 с.
7. Кудряшов И.А., Кушнер Н.Х., Петрова Л.В., Силов Н.А.; под редакцией Кудряшова И.А. Программирование, отладка и решение задач на ЭВМ единой серии. Язык Фортран: учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.
8. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ: практическое руководство. Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. - 238с.
9. В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. Теплопередача. Учебник для вузов, Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.

10. Тепломассоперенос в одно- и двухфазных средах. – М.: Наука, 1971. – 164 с.

11. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

12. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М.: Наука, 1973. – 228 с.

13. О.А. Геращенко, В.Г. Федоров. Тепловые и температурные измерения. Справочной руководство. – Киев: Наукова думка, 1965. – 304 с.

14. П. Шнейдер. Инженерные проблемы теплопроводности. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 478 с.

15. Гува А.Я. Краткий теплофизический справочник. – Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. – 300 с.

Приложение А

Прямая задача теплопроводности. Листинг программы.

```
uses Utils;
label 1,2;
const
  omega = 2;
  Nx = 13;Ny = 13;Nz = 13;
  E1 = 0.01; E2 = 0.15;
  SB = 5.67E-8;
  qf = 100000;
  T0 = 293.16;T0n = 293.16;
  KT = 2; E = 0.75;A = 0.75;
  LX = 0.01;LY = 0.01;LZ = 0.01;

type
  Tmass = array[1..Nx, 1..Ny, 1..Nz] of real;

var
  i, j, k: byte;
  d1, d2, d3, d4, d5, d6, d7, d8: real;
  b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7: real;
  c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7: real;
  s1, s2, s3, s4: real;
  dx, dy, dz, Toc4, res: real;
  F1, F2, F3, F4, Qrx1, Qrx2, Qry1, Qry2, Qrz1, Qrz2, Qv, Qrsum, dQ, Qp, M,
  M1: real;
  T, TT: Tmass;

function deg(x, y: real): real;
begin
  deg := exp(y * ln(x));
end;

begin

  M:=0;
  M1:=0;
  {Шаги}
  dx := LX / (Nx - 1);
  dy := LY / (Ny - 1);
  dz := LZ / (Nz - 1);
  {Коэффициенты}
  s1 := 2 * (KT / (dx * dx) + KT / (dy * dy) + KT / (dz * dz));
  s2 := KT / (dx * dx * s1);
  s3 := KT / (dy * dy * s1);
  s4 := KT / (dz * dz * s1);
  d3 := KT / (2 * dz);
  d1 := 3 * d3;
  d2 := 4 * d3;
  d4 := E * SB;
  d5 := qf * A;
  d6 := E * SB;
  d7 := 4 * d4;
  d8 := 4 * d6;
  b3 := KT / (2 * dy);
  b1 := 3 * b3;
  b2 := 4 * b3;
  b4 := E * SB;
  b5 := E * SB;
  b6 := 4 * b4;
  b7 := 4 * b5;
```

```
  c3 := KT / (2 * dx);
  c1 := 3 * c3;
  c2 := 4 * c3;
  c4 := E * SB;
  c5 := E * SB;
  c6 := 4 * c4;
  c7 := 4 * c5;
  F1 := dx * dy;
  F2 := dx * dz;
  F3 := dy * dz;
  F4 := (LX-dx)*(LY-dy);
  Toc4 := exp(4 * ln(T0));

  for i := 1 to Nx do
    for j := 1 to Ny do
      for k := 1 to Nz do
      begin
        T[i, j, k] := T0n;
        TT[i, j, k] := T0n;
      end;

      {РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУР}
  begin
    1:
    for i := 2 to Nx - 1 do
      for j := 2 to Ny - 1 do
        for k := 2 to Nz - 1 do
        begin
          T[i, j, k] := TT[i, j, k];
        end;

      {Расчет температур на верхней грани (i;j;1)}
    for j := 2 to Ny - 1 do
      for i := 2 to Nx - 1 do
      begin
        repeat
          T[i, j, 1] := TT[i, j, 1];
          TT[i, j, 1] := T[i, j, 1] - (d1 * T[i, j, 1] - d2 * T[i, j, 2] + d3
* T[i, j, 3] + d4 * (deg(T[i, j, 1], 4) - Toc4) - d5) / (d7 * deg(T[i, j, 1],
3) + d1);
          res := abs(TT[i, j, 1] - T[i, j, 1]);
        until res < E1
      end;

      {Расчет температур на задней грани (i;1;k)}
    for k := 2 to Nz - 1 do
      for i := 2 to Nx - 1 do
      begin
        repeat
          T[i, 1, k] := TT[i, 1, k];
          TT[i, 1, k] := T[i, 1, k] - (b1 * T[i, 1, k] - b2 * T[i, 2, k] + b3
* T[i, 3, k] + b4 * (deg(T[i, 1, k], 4) - Toc4)) / (b6 * deg(T[i, 1, k], 3) +
b1);
          res := abs(TT[i, 1, k] - T[i, 1, k]);
        until res < E1
      end;

      {Расчет температур на передней грани (i;Ny;k)}
    for k := 2 to Nz - 1 do
      for i := 2 to Nx - 1 do
      begin
        repeat
          T[i, Ny, k] := TT[i, Ny, k];
```

```
          TT[i, Ny, k] := T[i, Ny, k] - (b1 * T[i, Ny, k] - b2 * T[i, Ny - 1,
k] + b3 * T[i, Ny - 2, k] + b5 * (deg(T[i, Ny, k], 4) - Toc4)) / (b7 *
deg(T[i, Ny, k], 3) + b1);
          res := abs(TT[i, Ny, k] - T[i, Ny, k]);
        until res < E1
      end;

      {Расчет температур на левой грани (1;j;k)}
    for k := 2 to Nz - 1 do
      for j := 2 to Ny - 1 do
      begin
        repeat
          T[1, j, k] := TT[1, j, k];
          TT[1, j, k] := T[1, j, k] - (c1 * T[1, j, k] - c2 * T[2, j, k] + c3
* T[3, j, k] + c4 * (deg(T[1, j, k], 4) - Toc4)) / (c6 * deg(T[1, j, k], 3) +
c1);
          res := abs(TT[1, j, k] - T[1, j, k]);
        until res < E1
      end;

      {Расчет температур на правой грани (Nx;j;k)}
    for k := 2 to Nz - 1 do
      for j := 2 to Ny - 1 do
      begin
        repeat
          T[Nx, j, k] := TT[Nx, j, k];
          TT[Nx, j, k] := T[Nx, j, k] - (c1 * T[Nx, j, k] - c2 * T[Nx - 1, j,
k] + c3 * T[Nx - 2, j, k] + c5 * (deg(T[Nx, j, k], 4) - Toc4)) / (c7 *
deg(T[Nx, j, k], 3) + c1);
          res := abs(TT[Nx, j, k] - T[Nx, j, k]);
        until res < E1
      end;

      {Расчет температур на нижней грани (i;j;Nz)}
    for j := 2 to Ny - 1 do
      for i := 2 to Nx - 1 do
      begin
        repeat
          T[i, j, Nz] := TT[i, j, Nz];
          TT[i, j, Nz] := T[i, j, Nz] - (d1 * T[i, j, Nz] - d2 * T[i, j, Nz -
1] + d3 * T[i, j, Nz - 2] + d6 * (deg(T[i, j, Nz], 4) - Toc4)) / (d8 *
deg(T[i, j, Nz], 3) + d1);
          res := abs(TT[i, j, Nz] - T[i, j, Nz]);
        until res < E1
      end;

      {Расчет температур внутри образца (i;j;k)}
    for i := 2 to Nx - 1 do
      for j := 2 to Ny - 1 do
        for k := 2 to Nz - 1 do
        begin
          TT[i, j, k] := s2 * (TT[i + 1, j, k] + TT[i - 1, j, k]) + s3 *
(TT[i, j + 1, k] + TT[i, j - 1, k]) + s4 * (TT[i, j, k + 1] + TT[i, j, k -
1]);
          TT[i, j, k] := T[i, j, k] + omega * (TT[i, j, k] - T[i, j, k]);
         end;

    M:=M+1;
    if M > 2999 then writeln('ДОСТИГНУТО ПРЕДЕЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО ИТЕРАЦИЙ
(3000)');
    if M > 2999 then goto 2;
```

```
    {ПРОВЕРКА}
  for i := 2 to Nx - 1 do
    for j := 2 to Ny - 1 do
      for k := 2 to Nz - 1 do
      begin
        res := abs(TT[i, j, k] - T[i, j, k]);
        if res > E1 then goto 1;
      end;
end;

    {РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ}

Qv := 0;
{Расчет падающего теплового потока на верхнюю грань (i,j,1)}
Qv := Qv + A * qf * F4;

Qrz1 := 0;
{Расчет излучаемого теплового потока с верхней грани (i;j;1)}
for i := 2 to Nx - 1 do
  for j := 2 to Ny - 1 do
  begin
    Qrz1 := Qrz1 + E * SB * (deg(T[i, j, 1], 4) - Toc4) * F1;
  end;

Qrz2 := 0;
{Расчет излучаемого теплового потока с нижней грани (i;j;Nz)}
for i := 2 to Nx - 1 do
  for j := 2 to Ny - 1 do
  begin
    Qrz2 := Qrz2 + E * SB * (deg(T[i, j, Nz], 4) - Toc4) * F1;
  end;

Qry1 := 0;
{Расчет излучаемого теплового потока с задней грани (i;1;k)}
for i := 2 to Nx - 1 do
  for k := 2 to Nz - 1 do
  begin
    Qry1 := Qry1 + E * SB * (deg(T[i, 1, k], 4) - Toc4) * F2;
  end;

Qry2 := 0;
{Расчет излучаемого теплового потока с передней грани (i;Ny;k)}
for i := 2 to Nx - 1 do
  for k := 2 to Nz - 1 do
  begin
    Qry2 := Qry2 + E * SB * (deg(T[i, Ny, k], 4) - Toc4) * F2;
  end;

Qrx1 := 0;
{Расчет излучаемого теплового потока с левой грани (1;j;k)}
for j := 2 to Ny - 1 do
  for k := 2 to Nz - 1 do
  begin
    Qrx1 := Qrx1 + E * SB * (deg(T[1, j, k], 4) - Toc4) * F3;
  end;

Qrx2 := 0;
{Расчет излучаемого теплового потока с правой грани (Nx;j;k)}
for j := 2 to Ny - 1 do
  for k := 2 to Nz - 1 do
  begin
    Qrx2 := Qrx2 + E * SB * (deg(T[Nx, j, k], 4) - Toc4) * F3;
  end;
```

```
  M1:=M1+1;
  {ПРОВЕРКА}
  Qrsum := Qrz1 + Qrz2 + Qry1 + Qry2 + Qrx1 + Qrx2;
  dQ := abs(Qv - Qrsum);
  Qp := abs(dQ / Qv) * 100;
  if Qp > E2 then goto 1;

  2:
      {ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА}
  writeln('Время выполнения программы в милисекундах = ',Milliseconds);
  writeln('Количество всех итераций = ', M);
  writeln('Количество итераций по Q = ', M1);
  writeln('Относительная погрешность расчета тепловых потоков = ', Qp:3:2,'
%');
  writeln('Значение теплового потока с нижней грани Qrz2 = ', Qrz2:3:4,'
Вт');
  writeln;
  writeln('Количество узлов по X = ', Nx);
  writeln('Количество узлов по Y = ', Ny);
  writeln('Количество узлов по Z = ', Nz);
  writeln;
  writeln('Входящий тепловой поток = ', Qv:3:3,' Вт');
  writeln('Сумма выходящих тепловых потоков = ', Qrsum:3:3,' Вт');
  writeln('Разность входящего и выходящих тепловых потоков = ', dQ:3:3,'
Вт');
  writeln('Относительная погрешность расчета тепловых потоков = ', Qp:3:2,'
%');
  writeln;
  i := 7;
  j := 7;
  for k := 1 to Nz do
  writeln('Температура в центре образца  = ', T[i, j, k]:3:2,' K');

end.
```

Приложение Б

Обратная задача теплопроводности. Листинг программы.

```
uses Utils;
label 1, 2, 3, 4, 5;
const
  omega = 2;
  Nx = 13;Ny = 13;Nz = 13;
  E1 = 0.01; E2 = 0.15; E3 = 0.1;
  SB = 5.67E-8;
  qf = 100000;
  Qizm = 0.7465;
  T0 = 293.16;T0n = 293.16;
  E = 0.75;A = 0.75;
  dKT = 0.01;
  LX = 0.01;LY = 0.01;LZ = 0.01;

type
  Tmass = array[1..Nx, 1..Ny, 1..Nz] of real;

var
  i, j, k: byte;
  d1, d2, d3, d4, d5, d6, d7, d8: real;
  b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7: real;
  c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7: real;
  s1, s2, s3, s4: real;
  dx, dy, dz, Toc4, res: real;
  F1, F2, F3, F4, Qrx1, Qrx2, Qry1, Qry2, Qrz1, Qrz2, Qv, Qrsum, dQ, Qp, M,
M1: real;
  T, TT: Tmass;
  KT1, KT2, KTopt, KTsr, KTL, KTR, KT, QQ1, QQ2, Qn1, Qn2: real;

function deg(x, y: real): real;
begin
  deg := exp(y * ln(x));
end;

begin
  M:=0;
  M1:=0;
  KT1 := 1;
  KT2 := 10;

  for i := 1 to Nx do
  for j := 1 to Ny do
    for k := 1 to Nz do
    begin
      T[i, j, k] := T0n;
      TT[i, j, k] := T0n;
    end;

  4:
  KTsr := (KT1 + KT2) / 2;
  KTL := KTsr - dKT;
  KTR := KTsr + dKT;
  KT := KTL;

  2:
  {Шаги}
  dx := LX / (Nx - 1);
  dy := LY / (Ny - 1);
  dz := LZ / (Nz - 1);
```

```
  {Коэффициенты}
  s1 := 2 * (KT / (dx * dx) + KT / (dy * dy) + KT / (dz * dz));
  s2 := KT / (dx * dx * s1);
  s3 := KT / (dy * dy * s1);
  s4 := KT / (dz * dz * s1);
  d3 := KT / (2 * dz);
  d1 := 3 * d3;
  d2 := 4 * d3;
  d4 := E * SB;
  d5 := qf * A;
  d6 := E * SB;
  d7 := 4 * d4;
  d8 := 4 * d6;
  b3 := KT / (2 * dy);
  b1 := 3 * b3;
  b2 := 4 * b3;
  b4 := E * SB;
  b5 := E * SB;
  b6 := 4 * b4;
  b7 := 4 * b5;
  c3 := KT / (2 * dx);
  c1 := 3 * c3;
  c2 := 4 * c3;
  c4 := E * SB;
  c5 := E * SB;
  c6 := 4 * c4;
  c7 := 4 * c5;
  F1 := dx * dy;
  F2 := dx * dz;
  F3 := dy * dz;
  F4 := (LX-dx)*(LY-dy);
  Toc4 := exp(4 * ln(T0));

      {РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУР}
  begin
    1:
    for i := 2 to Nx - 1 do
      for j := 2 to Ny - 1 do
        for k := 2 to Nz - 1 do
        begin
          T[i, j, k] := TT[i, j, k];
        end;

      {Расчет температур на верхней грани (i;j;1)}
    for j := 2 to Ny - 1 do
      for i := 2 to Nx - 1 do
      begin
        repeat
          T[i, j, 1] := TT[i, j, 1];
          TT[i, j, 1] := T[i, j, 1] - (d1 * T[i, j, 1] - d2 * T[i, j, 2] + d3
* T[i, j, 3] + d4 * (deg(T[i, j, 1], 4) - Toc4) - d5) / (d7 * deg(T[i, j, 1],
3) + d1);
          res := abs(TT[i, j, 1] - T[i, j, 1]);
        until res < E1
      end;

      {Расчет температур на задней грани (i;1;k)}
    for k := 2 to Nz - 1 do
      for i := 2 to Nx - 1 do
      begin
        repeat
          T[i, 1, k] := TT[i, 1, k];
```

```
          TT[i, 1, k] := T[i, 1, k] - (b1 * T[i, 1, k] - b2 * T[i, 2, k] + b3
* T[i, 3, k] + b4 * (deg(T[i, 1, k], 4) - Toc4)) / (b6 * deg(T[i, 1, k], 3) +
b1);
          res := abs(TT[i, 1, k] - T[i, 1, k]);
        until res < E1
      end;

      {Расчет температур на передней грани (i;Ny;k)}
    for k := 2 to Nz - 1 do
      for i := 2 to Nx - 1 do
      begin
        repeat
          T[i, Ny, k] := TT[i, Ny, k];
          TT[i, Ny, k] := T[i, Ny, k] - (b1 * T[i, Ny, k] - b2 * T[i, Ny - 1,
k] + b3 * T[i, Ny - 2, k] + b5 * (deg(T[i, Ny, k], 4) - Toc4)) / (b7 *
deg(T[i, Ny, k], 3) + b1);
          res := abs(TT[i, Ny, k] - T[i, Ny, k]);
        until res < E1
      end;

      {Расчет температур на левой грани (1;j;k)}
    for k := 2 to Nz - 1 do
      for j := 2 to Ny - 1 do
      begin
        repeat
          T[1, j, k] := TT[1, j, k];
          TT[1, j, k] := T[1, j, k] - (c1 * T[1, j, k] - c2 * T[2, j, k] + c3
* T[3, j, k] + c4 * (deg(T[1, j, k], 4) - Toc4)) / (c6 * deg(T[1, j, k], 3) +
c1);
          res := abs(TT[1, j, k] - T[1, j, k]);
        until res < E1
      end;

      {Расчет температур на правой грани (Nx;j;k)}
    for k := 2 to Nz - 1 do
      for j := 2 to Ny - 1 do
      begin
        repeat
          T[Nx, j, k] := TT[Nx, j, k];
          TT[Nx, j, k] := T[Nx, j, k] - (c1 * T[Nx, j, k] - c2 * T[Nx - 1, j,
k] + c3 * T[Nx - 2, j, k] + c5 * (deg(T[Nx, j, k], 4) - Toc4)) / (c7 *
deg(T[Nx, j, k], 3) + c1);
          res := abs(TT[Nx, j, k] - T[Nx, j, k]);
        until res < E1
      end;

      {Расчет температур на нижней грани (i;j;Nz)}
    for j := 2 to Ny - 1 do
      for i := 2 to Nx - 1 do
      begin
        repeat
          T[i, j, Nz] := TT[i, j, Nz];
          TT[i, j, Nz] := T[i, j, Nz] - (d1 * T[i, j, Nz] - d2 * T[i, j, Nz -
1] + d3 * T[i, j, Nz - 2] + d6 * (deg(T[i, j, Nz], 4) - Toc4)) / (d8 *
deg(T[i, j, Nz], 3) + d1);
          res := abs(TT[i, j, Nz] - T[i, j, Nz]);
        until res < E1
      end;

      {Расчет температур внутри образца (i;j;k)}
    for i := 2 to Nx - 1 do
      for j := 2 to Ny - 1 do
        for k := 2 to Nz - 1 do
```

```
        begin
          TT[i, j, k] := s2 * (TT[i + 1, j, k] + TT[i - 1, j, k]) + s3 *
(TT[i, j + 1, k] + TT[i, j - 1, k]) + s4 * (TT[i, j, k + 1] + TT[i, j, k -
1]);
          TT[i, j, k] := T[i, j, k] + omega * (TT[i, j, k] - T[i, j, k]);
        end;

    M:=M+1;
    if M > 2999 then writeln('ДОСТИГНУТО ПРЕДЕЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО ИТЕРАЦИЙ
(3000)');
    if M > 2999 then goto 5;

      {ПРОВЕРКА}
    for i := 2 to Nx - 1 do
      for j := 2 to Ny - 1 do
        for k := 2 to Nz - 1 do
        begin
          res := abs(TT[i, j, k] - T[i, j, k]);
          if res > E1 then goto 1;
        end;
  end;

      {РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ}

  Qv := 0;
  {Расчет падающего теплового потока на верхнюю грань (i,j,1)}
  Qv := Qv + A * qf * F4;

  Qrz1 := 0;
  {Расчет излучаемого теплового потока с верхней грани (i;j;1)}
  for i := 2 to Nx - 1 do
    for j := 2 to Ny - 1 do
    begin
      Qrz1 := Qrz1 + E * SB * (deg(T[i, j, 1], 4) - Toc4) * F1;
    end;

  Qrz2 := 0;
  {Расчет излучаемого теплового потока с нижней грани (i;j;Nz)}
  for i := 2 to Nx - 1 do
    for j := 2 to Ny - 1 do
    begin
      Qrz2 := Qrz2 + E * SB * (deg(T[i, j, Nz], 4) - Toc4) * F1;
    end;

  Qry1 := 0;
  {Расчет излучаемого теплового потока с задней грани (i;1;k)}
  for i := 2 to Nx - 1 do
    for k := 2 to Nz - 1 do
    begin
      Qry1 := Qry1 + E * SB * (deg(T[i, 1, k], 4) - Toc4) * F2;
    end;

  Qry2 := 0;
  {Расчет излучаемого теплового потока с передней грани (i;Ny;k)}
  for i := 2 to Nx - 1 do
    for k := 2 to Nz - 1 do
    begin
      Qry2 := Qry2 + E * SB * (deg(T[i, Ny, k], 4) - Toc4) * F2;
    end;

  Qrx1 := 0;
  {Расчет излучаемого теплового потока с левой грани (1;j;k)}
  for j := 2 to Ny - 1 do
```

```
    for k := 2 to Nz - 1 do
    begin
      Qrx1 := Qrx1 + E * SB * (deg(T[1, j, k], 4) - Toc4) * F3;
    end;

  Qrx2 := 0;
  {Расчет излучаемого теплового потока с правой грани (Nx;j;k)}
  for j := 2 to Ny - 1 do
    for k := 2 to Nz - 1 do
    begin
      Qrx2 := Qrx2 + E * SB * (deg(T[Nx, j, k], 4) - Toc4) * F3;
    end;

  M1:=M1+1;
  {ПРОВЕРКА}
  Qrsum := Qrz1 + Qrz2 + Qry1 + Qry2 + Qrx1 + Qrx2;
  dQ := abs(Qv - Qrsum);
  Qp := abs(dQ / Qv) * 100;
  if Qp > E2 then goto 1;

  if KT = KTL then
  Qn1 := Qrz2;
  if KT = KTR then
  Qn2 := Qrz2;

  if KT = KTR then goto 3;

  KT := KTR;
  goto 2;

  3:
  QQ1 := abs(Qizm - Qn1);
  QQ2 := abs(Qizm - Qn2);

  if QQ1<QQ2 then KT2 := KTL
  else KT1 := KTR;

  if (KT2 - KT1) > E3 then goto 4;
  KTopt := (KT1 + KT2) / 2;

  5:
      {ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА}
  writeln('Время выполнения программы в милисекундах = ',Milliseconds );
  writeln('Количество всех итераций = ', M);
  writeln('Количество итераций по Q = ', M1);
  writeln;
  writeln('Количество узлов по X = ', Nx);
  writeln('Количество узлов по Y = ', Ny);
  writeln('Количество узлов по Z = ', Nz);
  writeln;
  writeln('Относительная погрешность расчета тепловых потоков = ', Qp:3:2,'
%');
  writeln('Тепловой поток уходящих с нижней грани = ', Qrz2:3:3,' Вт');
  writeln('Заданный тепловой поток с нижней грани = ', Qizm:3:3,' Вт');
  writeln('Входящий тепловой поток = ', Qv:3:3,' Вт');
  writeln('Сумма выходящих тепловых потоков = ', Qrsum:3:3,' Вт');
  writeln('Разность входящего и выходящих тепловых потоков = ', dQ:3:3,'
Вт');
  writeln;
  writeln('КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ = ', KTopt:3:4,' Вт/(м*К)');

end.
```

Приложение В

Раздел 1
Обзор литературы

Раздел 2.1
Постановка коэффициентной обратной стационарной задачи теплопроводности для прямоугольного параллелепипеда

Раздел 2.2
Выбор метода решения

Раздел 2.3
Составление конечно – разностных уравнений

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4А	Яценко К.М.		

Консультант кафедры ИЯЭИ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Соколова Э.Я.			

Консультант – лингвист кафедры ИЯЭИ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Соколова Э.Я.			

1. Literature review

The review of the literature [1, 2, 3, 4, 5] over the past few years has shown that at present for measuring thermal conductivity the stationary plate method is the most frequently used. One of the main advantages of this method is the simplicity of equation calculations because a one-dimensional heat conduction problem is used in this task. The main problem is the creation of a one-dimensional heat flux passing through the sample. With increasing temperature, the problem of organizing the one-dimensional heat flow is becoming more complicated, which leads to a complicated construction of the measuring system. The plate method for measuring the thermal conductivity is used for a long time and has a lot of design solutions at the design of measuring systems for specific cases. Some variations of measuring systems based on this method are described below.

1.1 Experimental determination of thermal conductivity coefficient of superthin liquid composite thermal insulation coatings

Superthin liquid composite thermal insulation coatings (insulating paint) began to appear on the market of thermal insulation coatings not so long ago. It has good insulating properties (for example, thermal conductivity of such materials is approximately equal to $\lambda = 0{,}001 - 0{,}0015 Vt/(m \cdot {}^{\circ}C)$. Manufacturers claim that such layer of thermal insulation coatings from 1 to 3 millimeters thick can replace a few centimeters of mineral wool insulation.

The thermal properties of these thermal insulation coatings are still not fully investigated. Therefore, to determine the thermal conductivity of this insulation coatings, as one of the main thermal characteristics of such coatings, experiment was carried out based on the existing regulatory procedure at stationary thermal conditions [1].

Experiment based on the existing regulatory procedure at stationary thermal conditions was carried out to determine the thermal conductivity since the coefficient of thermal conductivity is one of the main thermal characteristics of such coatings.

The measuring system was developed for the experiment. The measuring system included the following components:

1. The device for testing samples (Fig. 1).

2. The device "Terem - 4.0" to measure readings from thermocouples.

3. "Chromel - Copel" thermocouples made of wire with thickness of $\delta = 0,2mm$.

4. The plate from material with a known thermal conductivity (plexiglas, thickness $\delta = 3,2mm$, $\lambda = 0,19Vt/(\text{m}\cdot{}^{\circ}C)$).

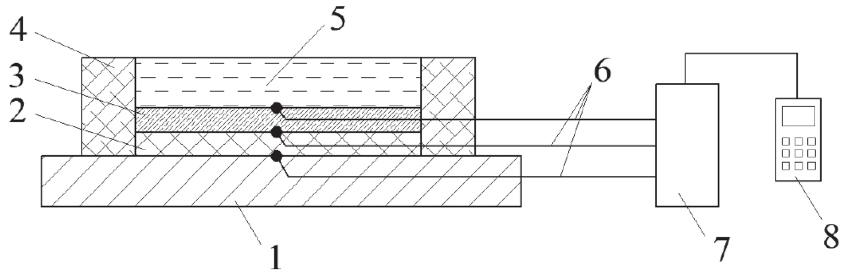

Figure 1 – Schematic diagram of measurement system

1 is source of stationary heat flow; 2 is layer of material with known thickness and thermal conductivity coefficient; 3 is layer of insulating paint; 4 is insulator (polystyrene); 5 is "refrigerator" (container with water); 6 are thermocouples; 7 is the switching device; 8 is measuring device "Terem - 4.0"

The effective thermal conductivity coefficient of the material sample λ_{effu} is calculated as follows: (1.1):

$$\lambda_{effu} = \frac{d_u}{\frac{\Delta T_u}{q_u} - 2R_L}, \tag{1.1}$$

where d_u – thickness of the sample during the test, m; ΔT_u – temperature difference between surfaces of the sample, $^{\circ}C$; q_u – the density of stationary heat flow passing through the sample, Vt/m^2; R_L – the thermal resistance of the sheet material, $(m^2 \cdot {}^{\circ}C)/Vt$.

The paint layer № 3 (fig. 1) was applied uniformly onto a copper plate of 0.5 mm thickness. The thermal resistance of the copper plate was taken into account in the calculation of the formula (1.1) as a component of R_L.

Specific heat flux q_u, Vt/m^2, in formula (1.1) is defined as:

$$q_u = \frac{\lambda_{layer\,2}\left(t_1 - t_2\right)}{\delta_{layer\,2}},$$

where $\lambda_{layer\,2}$, $\delta_{layer\,2}$ is thermal conductivity and thickness of the plexiglas layer (fig. 1); t_1, t_2 is temperature at the boundaries of the "source of heat - a layer of plexiglas" and "layer of plexiglas – test sample" (fig. 1).

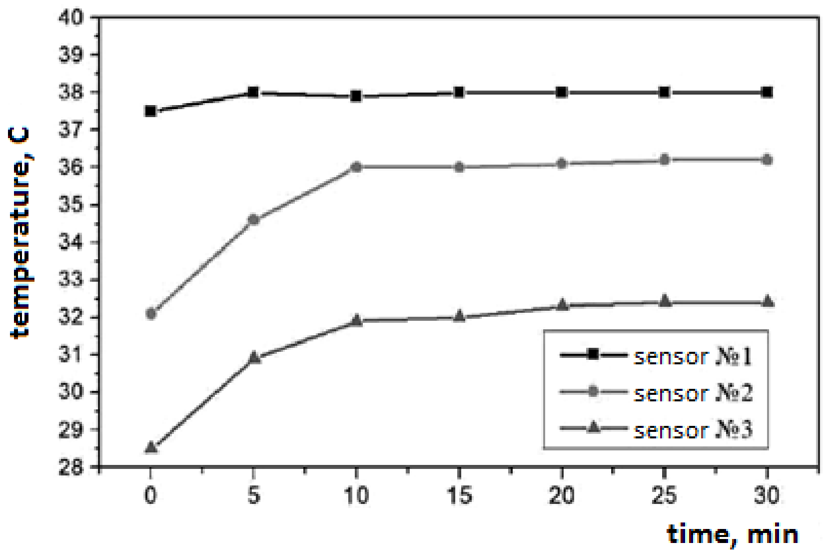

Figure 2 – Readings of the unit according to the data of three thermocouple detectors over time

The presented graph shows that the readings of device reach a stationary level in 20 minutes from the beginning of its work. This also was taken into account during the experiment.

The measurements were carried out for two samples of paint under different temperature conditions at various heat fluxes. This was done to analyze the dynamics of the thermal conductivity on temperature.

The error was $\varepsilon = 1{,}85\%$. The total error in determining the thermal conductivity based on the error of the study (3%) and device deviation (1%) was 5.85%.

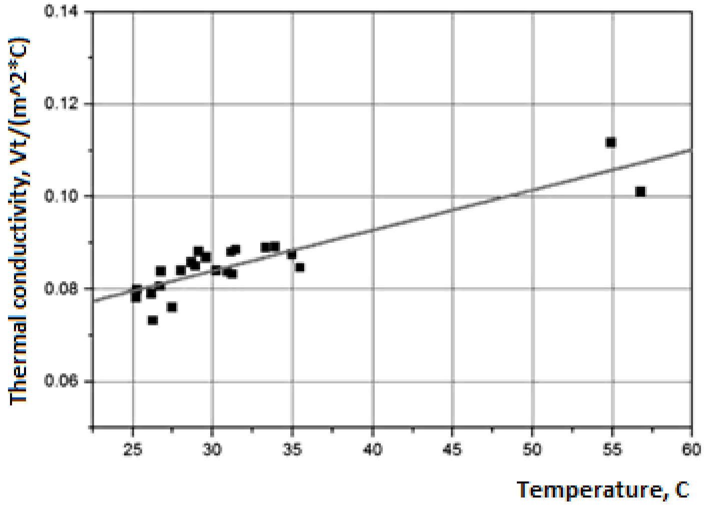

Figure 3 – Experimental results on determination of paint sample № 1 thermal conductivity

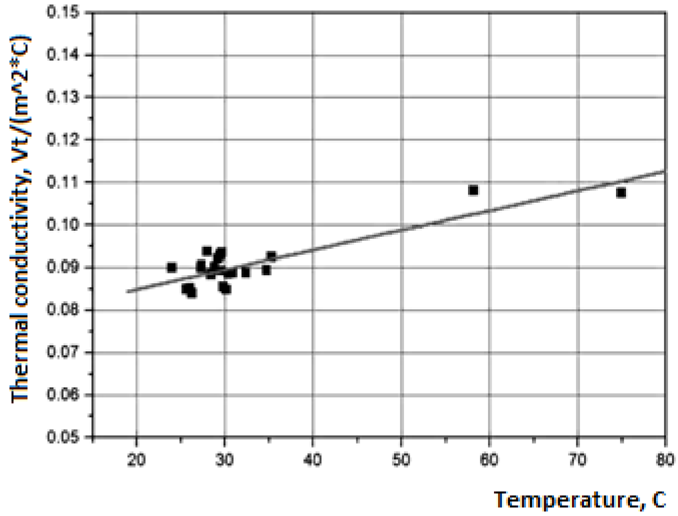

Figure 4 – Experimental results on determining thermal conductivity of paint sample № 2

1.2 Measurement of thermal conductivity of thermal insulation coatings

Described below installation was developed by the authors of paper [2]. In this work the comparative method of measurement of thermal conductivity and creating in the test sample the one-dimensional stationary thermal flux ids used. All obtained data were being recorded on the computer.

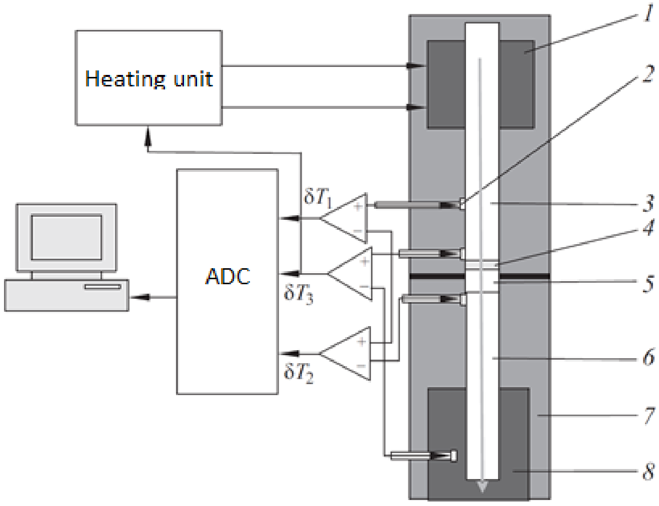

Figure 5 – The block - scheme of installation for thermal conductivity measurement

1 is thermostat ($T \approx 373K$); 2 are temperature sensors; 3, 6 are inserts; 4 is coating; 5 is sample; 7 is thermal insulation; 8 is thermostat ($T \approx 273K$).

Figure 5 shows a block – scheme of installation. It consists of a heat chamber, three differential amplifiers and a three – channel analog – digital converter (ADC) that is connected to a personal computer (PC) with installed measurements software [2].

The inserts are made in the shape of a round rod with a diameter of 14 mm from the known material (23 % Fe, 61 % Ni, 16 % Cr) with thermal conductivity λ_1. These inserts have identical sizes.

For the upper insert with a known thermal conductivity λ_1 it is possible to calculate the density of heat flux passing through "upper inset - sample" - "lower inset -sample":

$$q_1 = \lambda_1 c_1 dU_1, \qquad (1.2)$$

where dU_1 is output signal of the upper amplifier (shown in fig.5) which is proportional to the temperature gradient δT_1 of the upper insert; c_1 is coefficient of proportionality between the output signal of the amplifier and the temperature gradient of the insert.

The density of heat flux going through the sample q_{sample} is proportional to the density of heat flux of the top insert q_1 with a coefficient of proportionality c_x, which enables to take into account the parasitic heat fluxes passing through sample:

$$q_{sample} = c_x q_1 = \lambda_{sample} c_2 dU_2,$$

dU_2 is output signal of the lower amplifier (shown in fig.5) which is proportional to the temperature gradient δT_2 of the sample; c_2 is coefficient of proportionality between the output signal of the amplifier and the temperature gradient of the sample; $\lambda_{обр}$ is sample thermal conductivity.

We can calculate the thermal conductivity of the sample knowing the temperature gradient of the sample and determining the density of a heat flux, which passes through the sample from (1.2). The equation can be presented as follows:

$$\lambda_{sample} = C\lambda_1 \frac{dU_1}{dU_2},$$

$C = c_x c_1 / c_2$ is coefficient characterizing the sensitivity of temperature measurement. This coefficient takes into account the geometry of the arrangement of the temperature sensors. This value is determined by the additional measurement when the sample of known thermal conductivity is placed instead of the test sample.

1.3 Precise measurements of the super – high thermal conductivity coefficient into thin plates

Modern electronics components, particularly power electronics, generate a significant amount of heat. At present the heat sink devices have been created to ensure reliable operation of these components. The heat sink devices use synthetic diamond plate and have ultra-high thermal conductivity. Accurate measurements of thermal conductivities of these materials have a great importance for the development of modern power electronics devices [3].

The new method for measuring the thermal conductivity of polycrystalline diamond plates is developed. The method includes deposition of two thin film full bridge resistance thermometers on two opposite surfaces of the plate. The plate is heated from one side in the area, where one of the resistance thermometers is located, by the contact with hot copper bar. The plate is cooled from the opposite side in area, where second of the resistance thermometers is located, by the contact with other copper bar that is cooled by the water. Heat flux flowing through the plate is measured with help by thermocouples that are installed on the hot copper bar and is controlled by an automatic device. Thin film resistance thermometers made by vacuum deposition, have thickness 50 nanometers and practically are the parts of the plate surfaces. For this reason the measured temperatures are exactly coinciding with temperatures on the two opposite surfaces of the plate. The high sensitivity of the thin film resistance thermometers is provided using their elevated electrical resistance value that is permitting to have the bridge excitation not less than 20 V [3].

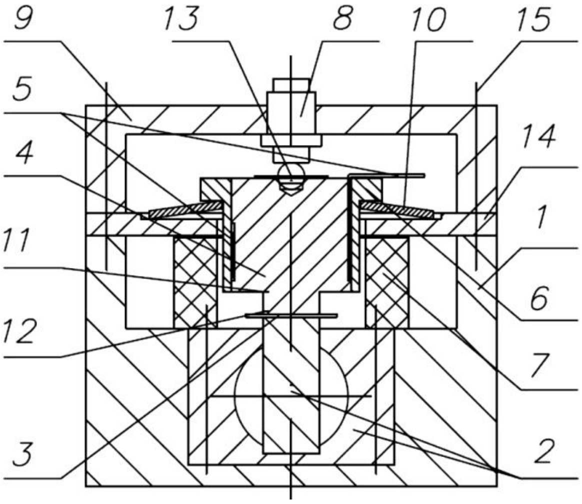

Figure 6 – Scheme of measuring stand

1 is body; 2 is cooling body; 3 is diamond plate; 4 are heaters rod; 5 is nichrome wire; 6 is cylindrical insert; 7 is heat insulation; 8 is micrometer screw; 9 is case cover; 10 is belleville spring; 11,12 are thermocouples; 13 is steel ball; 14 is support plate; 15 is screw.

The temperature measured by a thermocouple 11 is T_1, the temperature is measured by a thermocouple 12 is T_2, the surface temperature of the plate 3 is T_3, the surface temperature of the plate 3 (from the cooler) is T_4, water temperature is T_w.

The heat exchange processes occurring in this device can be described by the following equations:

$$w_{el}\eta = \frac{\lambda_m (T_1 - T_2)}{l} \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\frac{\lambda_m (T_1 - T_2)}{l} = \frac{\lambda_a}{t}(T_3 - T_4)$$

$$\frac{\lambda_a}{t}(T_3 - T_4)\frac{\pi d^2}{4} = \gamma_w (T_4 - T_w) S_w$$

$$\gamma_w (T_4 - T_w) S_w = cV \frac{\pi D^2}{4} \Delta T_w$$

where w_{el} is electric power of heaters; η is heater efficiency factor; λ_m is copper thermal conductivity; l is length of a contact rod; d is diameter of the contact rod; λ_a is expected heat conduction plate 3; t is plate thickness; γ_w is coefficient of heat removal for water rate V; S_w is cooling area surface; c is volumetric heat capacity of water; D is diameter of the water pipe in the cooling housing; ΔT_w is water temperature change.

The authors of paper [3] imply that the thermal conductivity of plates of synthetic diamonds can be accurately measured by this method [3] and means of measurements.

1.4 The device for measuring thermal conductivity of semiconductors and their alloys at high temperatures

The installation for researching the thermal conductivity of semiconductors and its melts in a wide temperature range (300 - 1100K) was developed and offered by the authors of paper [4]. Unlike to previously used devices for this purpose, measurement of thermal conductivity was carried out in sealed autoclave filled spectrally pure argon after degassing to prevent oxidation, evaporation or decomposition of the substance.

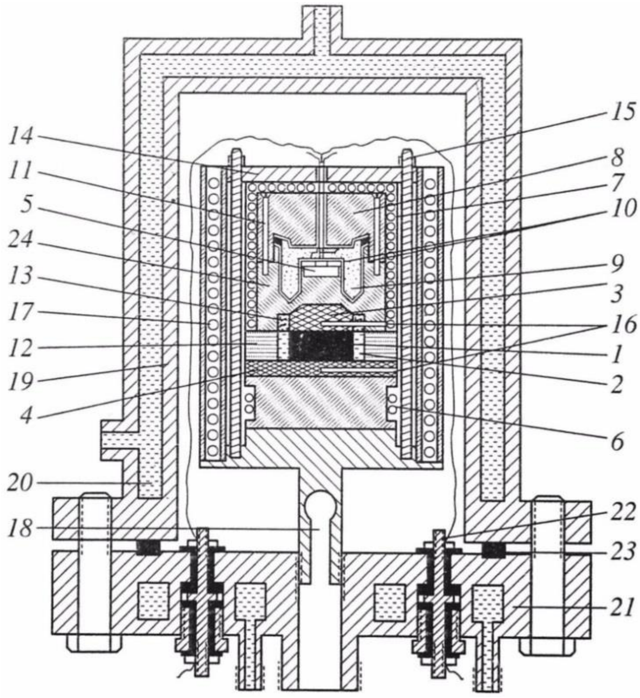

Figure 7 – Scheme of device for measuring the thermal conductivity of semiconductors and their melts

1 is test sample; 2 is quartz cell; 3, 4 are worktops of gradient heater; 5 is gradient heater; 6 is «refrigerator»; 7 шы compensation heater; 8 is top of the stainless steel frame of the device; 9 is copper protoxide layer; 10 is copper foil; 11 is clamping screw; 12, 13 is heat insulating material; 14 is load; 15 is screw; 16 are thermocouples; 17 is modal heater; 18 is branch pipe; 19 is autoclave; 20 is heat transfer liquid; 21 is autoclave lid; 22 are clips; 23 is fluoroplastic gasket; 24 is lower part of the enclosure.

Figure 7 shows a scheme of the device for measuring the thermal conductivity of semiconductors and its melts. The heat flux from the gradient heater 5 passes through the sample 1. Temperature change on the sample is measured by thermocouples 16. Neglecting the lateral heat loss (assuming that the temperature distribution along the surfaces surrounding the sample virtually the same as the temperature distribution along the sample) heat conductivity of the material can be calculated by the formula:

$$\lambda = \frac{IU}{\Delta T}\frac{L}{S},$$

I is current flowing through the heating; U is terminal voltage of gradient heater; S and L is cross-sectional area and thickness of the test sample.

The total error in determining the thermal conductivity due to the current measurement errors, voltage, temperature, and average geometric size of the sample does not exceed 6% at 1000K. The heat losses from the current-carrying and thermocouple wires, layer of copper oxide, quartz ring and insulating materials should be taken into account during the calculation of the systematic errors. The authors of paper [4] imply that these losses do not exceed 2% of the heat flux going through the sample.

1.5 The device for measuring thermal conductivity

Paper [5] describes a device for determining the thermal conductivity of the absolute stationary method flat layer, containing the measuring device and the cell. The device is manufactured from copper, contains a security element in the form of a porous glass, a busy thermoelectric. A high thermoelectric power evolved by pair of copper and thermoelectric allows controlling heat loss with high accuracy. The cell is made of steel 12X18H10T and has a sylphon. The device allows with an error ±1,2% to investigate the thermal conductivity of gases, solids, liquids in the temperature range 100-700K and pressures up to 100 MPa. [5].

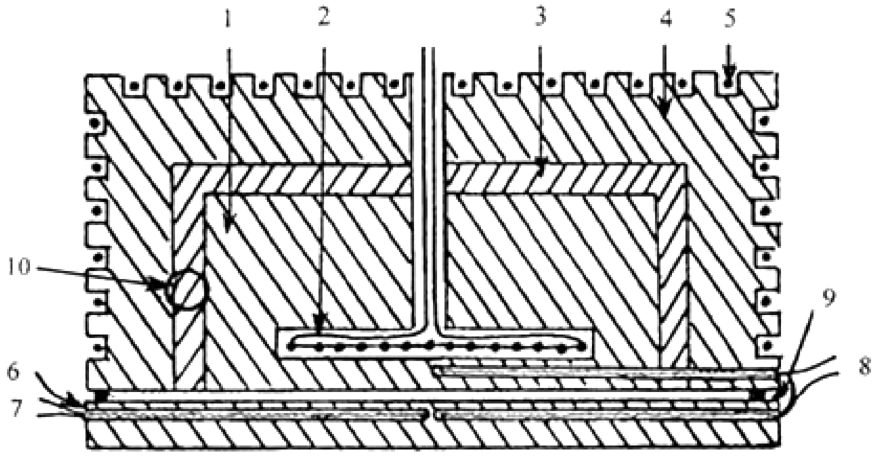

Figure 8 – The device for measuring thermal conductivity

1, 4 is inner and outer copper units; 2,5 is inner and outer heaters; 3 is ceramic protective glass; 6 is «refrigerator»; 7, 8 is absolute (T) and differential (ΔT) thermocouples; 9 is fixed gap; 10 is ceramic glass incision.

Thermal conductivity (λ) is estimated by the Fourier law by the formula for the stationary method of plane horizontal layer:

$$\lambda = P \cdot L \cdot S^{-1} \cdot \Delta T^{-1}$$

where λ is coefficient of thermal conductivity; P is power of inner heater, passed through the sample; L is sample thickness; S is efficient working surface of the device; ΔT is temperature difference across the sample.

Uncontrolled heat losses passing through the cylindrical surface 3 have also been calculated:

$$\Delta Q = (\lambda \pi r^2 \Delta T) L^{-1}$$

where λ is thermal conductivity of the cylinder material; ΔT is temperature difference between the inner and outer surface 3; r is inner radius of the cylinder; L is thickness of the cylinder wall.

This device allows measuring the thermal conductivity of a lot of substances in a wide range of its state parameters by using a single cell. The authors of paper [5] imply that this device has no analogs in our country and abroad.

2. Using a three-dimensional problem to determine the thermal conductivity

2.1 Formulation of the inverse stationary heat conduction problem for a cuboid

Let us consider a stationary heat conduction problem for a cuboid (fig. 9).

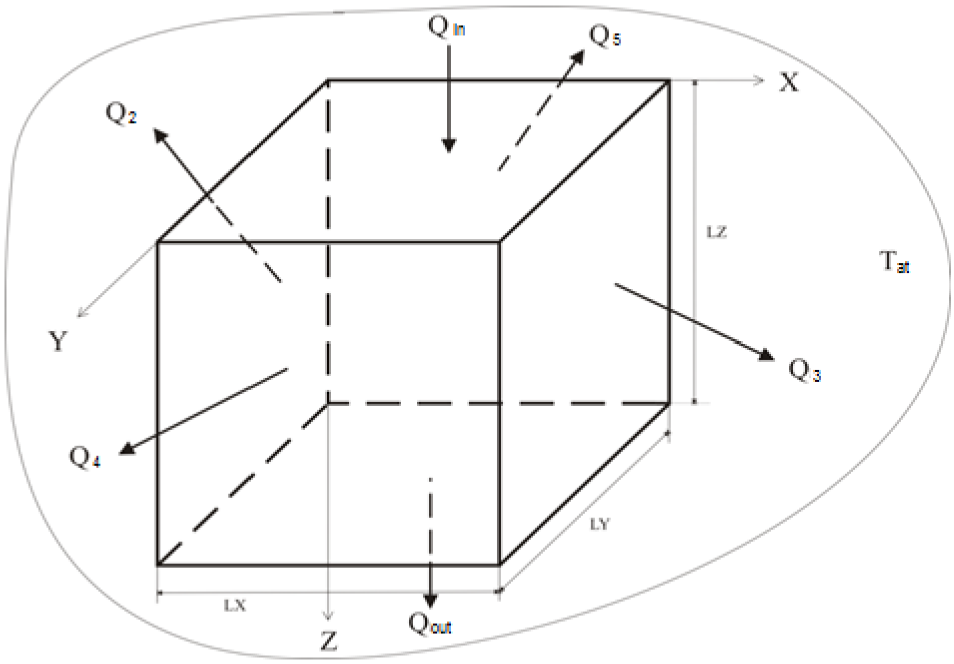

Figure 9 – The scheme of distribution of heat fluxes in the sample [6]

The test object is a model of a cuboid with the dimensions LX, LY, LZ. It is heated by the heat flux at one side but loses heat from all sides to the environment by radiation. Ambient temperature is constant and equal to T_{oc}. Integral emission coefficient ε and absorption coefficient of the sample surface A will take constant and coefficient of thermal conductivity λ does not depend on temperature.

The mathematical statement of the inverse stationary heat conduction problem for cuboid includes the heat equation (2.1), non-linear boundary conditions (2.2 - 2.7) and extreme conditions (2.8):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial Y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}=0, \tag{2.1}$$

$$q_F(X,Y)\cdot A = -\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial Z}\right)_{Z=0} + \varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{Z=0}^4 - T_{oc}^4), \tag{2.2}$$

$$-\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial Z}\right)_{LZ} = \varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{LZ}^4 - T_{oc}^4), \tag{2.3}$$

$$\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial X}\right)_{X=0} = \varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{X=0}^4 - T_{oc}^4), \tag{2.4}$$

$$-\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial X}\right)_{LX} = \varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{LX}^4 - T_{oc}^4), \tag{2.5}$$

$$\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial Y}\right)_{Y=0} = \varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{Y=0}^4 - T_{oc}^4), \tag{2.6}$$

$$-\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial Y}\right)_{LY} = \varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{LY}^4 - T_{oc}^4), \tag{2.7}$$

$$\left|Q_{LZ} - \varepsilon\sigma\int_F\left[T^4\left(z = LZ\right) - T_{oc}^4\right]\partial F\right| \to \min \tag{2.8}$$

where $T(X,Y,Z)$ is sample temperature; σ is Stefan - Boltzmann constant; X,Y,Z is cartesian coordinates; LX, LY, LZ is sample sizes; $q_F(X,Y)$ is density of incident heat flux; λ is coefficient of thermal conductivity; ε is emission coefficient; A is absorption coefficient; Q_{LZ} is integral heat flux outgoing from the bottom surface of the sample.

As follows from the mathematical statement of the inverse problem, coefficient of thermal conductivity can be calculated if experimentally determined density of the incident heat flux is q_F, outgoing total flow from the bottom surface of the sample equals Q_{LZ} and the ambient temperature is T_{oc}. Also, geometric dimensions and radiation characteristics of the sample should be known.

2.2 Choosing a solution method

As follows from the mathematical statement of the inverse problem, the solution of the direct problem of heat conduction in different numerical values of coefficient of the thermal conductivity is necessary to calculate the minimum of objective function (2.8).

Numerical methods are used to solve nonlinear problems to get a table of approximate values. The finite difference method was chosen for this task.

Finite difference equations were solved by a method of fixed-point iteration and iterative method of successive over-relaxation (accelerated Liebmann method).

The dichotomy method was used to determine the coefficient of thermal conductivity in the inverse problem.

2.3 Composing finite - difference equations

The idea of the finite difference method for solving boundary value problems is to replace the derivatives in the differential equation on its finite-difference approximations. To approximate equations used Lagranges interpolation polynomial of the second degree built on three consecutive points [7]. Finite difference approximation equation (2.1 – 2.7) is as follows:

$$\frac{\lambda}{\Delta x^2}\left(T_{i+1,j,k}+T_{i-1,j,k}\right)+\frac{\lambda}{\Delta y^2}\left(T_{i,j+1,k}+T_{i,j-1,k}\right)+\frac{\lambda}{\Delta z^2}\left(T_{i,j,k+1}+T_{i,j,k-1}\right)-2\lambda\cdot T_{i,j,k}\left(\frac{1}{\Delta x^2}+\frac{1}{\Delta y^2}+\frac{1}{\Delta z^2}\right)=0$$

$$q_F\cdot A+\frac{\lambda}{2\Delta z}(-T_{i,j,3}+4T_{i,j,2}-3T_{i,j,1})-\varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{i,j,1}^4-T_{oc}^4)=0,$$

$$-\frac{\lambda}{2\Delta z}(3T_{i,j,nz}-4T_{i,j,nz-1}-T_{i,j,nz-2})-\varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{i,j,nz}^4-T_{oc}^4)=0,$$

$$\frac{\lambda}{2\Delta x}(-T_{3,j,k}+4T_{2,j,k}-3T_{1,j,k})-\varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{1,j,k}^4-T_{oc}^4)=0,$$

$$-\frac{\lambda}{2\Delta x}(3T_{nx,j,k}-4T_{nx-1,j,k}-T_{nx-2,j,k})-\varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{nx,j,k}^4-T_{oc}^4)=0,$$

$$\frac{\lambda}{2\Delta y}(-T_{i,3,k}+4T_{i,2,k}-3T_{i,1,k})-\varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{i,1,k}^4-T_{oc}^4)=0,$$

$$-\frac{\lambda}{2\Delta y}(3T_{i,ny,k}-4T_{i,ny-1,k}-T_{i,ny-2,k})-\varepsilon\cdot\sigma\cdot(T_{i,ny,k}^{4}-T_{oc}^{4})=0.$$

where i,j,k is spatial grid points; $T_{i,j,k}$ is temperature in the spatial grid points; nx,ny,nz is number of nodes in the grid area of the axes directions x,y,z; $\Delta x,\Delta y,\Delta z$ is step of grid area.

Nonlinear equations have been converted by the Newton - Raphson formula to implement an iterative method [6]:

a) For the method of fixed-point iteration

$$T^{n}(i,j,k)=T^{n-1}(i,j,k)-\frac{f(T^{n-1}(i,j,k))}{f'(T^{n-1}(i,j,k))}$$

b) For the method of successive over-relaxation

$$T^{n}(i,j,k)=T^{n-1}(i,j,k)+\omega\cdot\left(T^{n}(i,j,k)-T^{n-1}(i,j,k)\right)$$

where n is iteration number; i,j,k are indices that determine the position of a node in a computing grid; ω is relaxation setting; $T^{n}(i,j,k)$ is current temperature value; $T^{n}(i,j,k)$ is new temperature value, calculated by this method; $f(T^{n-1})$ is function of temperature change at the node; $f'(T^{n-1})$ is derivative function of temperature change at the node.

The described below finite - difference equations was obtained after conversion by the Newton – Raphson method. It was applied in the program for calculating the temperature field:

a) For the method of fixed-point iteration

$$T_{i,j,k}^{n}=s_2\left(T_{i+1,j,k}^{n-1}+T_{i-1,j,k}^{n-1}\right)+s_3\left(T_{i,j+1,k}^{n-1}+T_{i,j-1,k}^{n-1}\right)+s_4\left(T_{i,j,k+1}^{n-1}+T_{i,j,k-1}^{n-1}\right).$$

$$T_{i,j,1}^{n}=T_{i,j,1}^{n-1}-\frac{d_1T_{i,j,1}^{n-1}-d_2T_{i,j,2}^{n-1}+d_3T_{i,j,3}^{n-1}+d_4(T_{i,j,1}^{4,n-1}-T_{oc}^{4})-d_5}{d_7T_{i,j,1}^{3,n-1}+d_1},$$

$$T^n_{i,j,nz} = T^{n-1}_{i,j,nz} - \frac{d_1 T^{n-1}_{i,j,nz} - d_2 T^{n-1}_{i,j,\mathrm{nz}-1} + d_3 T^{n-1}_{i,j,\mathrm{nz}-2} + d_6 (T^{4,n-1}_{i,j,\mathrm{nz}} - T^4_{oc})}{d_8 T^{3,n-1}_{i,j,\mathrm{nz}} + d_1},$$

$$T^n_{i,1,k} = T^{n-1}_{i,1,k} - \frac{b_1 T^{n-1}_{i,1,k} - b_2 T^{n-1}_{i,2,k} + b_3 T^{n-1}_{i,3,k} + b_4 (T^{4,n-1}_{i,1,k} - T^4_{oc})}{b_6 T^{3,n-1}_{i,1,k} + b_1},$$

$$T^n_{i,ny,k} = T^{n-1}_{i,ny,k} - \frac{b_1 T^{n-1}_{i,ny,k} - b_2 T^{n-1}_{i,\mathrm{ny}-1,k} + b_3 T^{n-1}_{i,\mathrm{ny}-2,k} + b_5 (T^{4,n-1}_{i,\mathrm{ny},k} - T^4_{oc})}{b_7 T^{3,n-1}_{i,\mathrm{ny},k} + b_1},$$

$$T^n_{1,j,k} = T^{n-1}_{1,j,k} - \frac{c_1 T^{n-1}_{1,j,k} - c_2 T^{n-1}_{2,j,k} + c_3 T^{n-1}_{3,j,k} + c_4 (T^{4,n-1}_{1,j,k} - T^4_{oc})}{c_6 T^{3,n-1}_{1,j,k} + c_1},$$

$$T^n_{nx,j,k} = T^{n-1}_{nx,j,k} - \frac{c_1 T^{n-1}_{nx,j,k} - c_2 T^{n-1}_{\mathrm{nx}-1,j,k} + c_3 T^{n-1}_{\mathrm{nx}-2,j,k} + c_5 (T^{4,n-1}_{\mathrm{nx},j,k} - T^4_{oc})}{c_7 T^{3,n-1}_{\mathrm{nx},j,k} + c_1},$$

b) For the method of successive over-relaxation for interior points

$$T^n_{i,j,k} = s_2\left(T^n_{i+1,j,k} + T^n_{i-1,j,k}\right) + s_3\left(T^n_{i,j+1,k} + T^n_{i,j-1,k}\right) + s_4\left(T^n_{i,j,k+1} + T^n_{i,j,k-1}\right),$$

$$T^n_{i,j,k} = T^{n-1}_{i,j,k} + \omega \cdot \left(T^n_{i,j,k} - T^{n-1}_{i,j,k}\right).$$

The integral heat balance must be respected in the sample during the stationary thermal conditions. The input and output heat fluxes should be equal. Equations that were used to calculate the incoming and outgoing heat fluxes are shown below:

$$Q_{вх} = A \cdot q_F \cdot LX \cdot LY \tag{2.9}$$

$$Q_{x=0} = \sum_{k=1}^{k=nz} \sum_{j=1}^{j=ny} \varepsilon \cdot \sigma (T^4_{1,j,k} - T^4_{oc}) \cdot \Delta y \cdot \Delta z \tag{2.10}$$

$$Q_{LX} = \sum_{k=1}^{k=nz} \sum_{j=1}^{j=ny} \varepsilon \cdot \sigma (T^4_{nx,j,k} - T^4_{oc}) \cdot \Delta y \cdot \Delta z \tag{2.11}$$

$$Q_{y=0} = \sum_{i=1}^{i=nx} \sum_{k=1}^{k=nz} \varepsilon \cdot \sigma (T^4_{i,1,k} - T^4_{oc}) \cdot \Delta x \cdot \Delta z \tag{2.12}$$

$$Q_{LY} = \sum_{i=1}^{i=nx} \sum_{k=1}^{k=nz} \varepsilon \cdot \sigma (T^4_{i,ny,k} - T^4_{oc}) \cdot \Delta x \cdot \Delta z \tag{2.13}$$

$$Q_{z=0} = \sum_{i=1}^{i=nx} \sum_{j=1}^{j=ny} \varepsilon \cdot \sigma (T_{i,j,1}^4 - T_{oc}^4) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \tag{2.14}$$

$$Q_{LZ} = \sum_{i=1}^{i=nx} \sum_{j=1}^{j=ny} \varepsilon \cdot \sigma (T_{i,j,nz}^4 - T_{oc}^4) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \tag{2.15}$$

where $Q_{вх}$ is integral heat flux incoming the sample; $Q_{ух}$ is total heat flow outgoing from the sample; $Q_{z=0}$ is heat flux outgoing from the top surface of the sample; Q_{LZ} is heat flux outgoing from the bottom surface of the sample; $Q_{x=0}, Q_{LX}, Q_{y=0}, Q_{LY}$ are heat flows outgoing from the side surfaces of the sample.