

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

Институт Энергетический

Направление подготовки 03.04.02 Физика

Кафедра Теоретической и промышленной теплотехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы

Математическое моделирование теплопереноса в системе «объект теплоснабжения – слой теплоизоляции – внешняя среда» и параметров микроклимата производственных помещений

УДК 697.112.2:519.876

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ51	Ульчиеков Михаил Андреевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Кузнецов Гений Владимирович	д.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Наталья Геннадьевна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Король Ирина Степановна	к.х.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ТПТ	Кузнецов Гений Владимирович	д.ф.-м.н., профессор		

Томск – 2017 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление подготовки 03.04.02 Физика

Кафедра Теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ТПТ

_____ Кузнецов Г. В.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5ФМ51	Ульчиеков Михаил Андреевич

Тема работы:

Оценка концентрирования частиц в закрученном потоке инерционного аппарата

Утверждена приказом директора

№235/с от 27.01.17 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:

30.05.17 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(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.).</i>	Объект исследования – теплоперенос в системе «объект теплоснабжения – слой теплоизоляции – окружающая среда». Требования к продукту – соответствие результатов математического моделирования данным экспериментальных исследований. Исходные данные: толщины слоев искусственной и естественной теплоизоляции объекта теплоснабжения.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Аналитический обзор литературных источников, с целью изучения современного состояния изученности проблемы. Численные решения

<i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений а мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры а исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	поставленной задачи. Обсуждение результатов исследования. Формулировка выводов и заключения.
Перечень графического материала	Слайды презентации на _____ страниц

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кузьмина Наталия Геннадьевна
Социальная ответственность	Король Ирина Степановна

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Введение, Современное состояние проблемы моделирования в системе «объект теплоснабжения – слой теплоизоляции – окружающая среда», Математическое моделирование в системе «объект теплоснабжения – слой теплоизоляции – окружающая среда», Результаты численного моделирования, Основные результаты и выводы (русский), Обзор литературы (английский)

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Кузнецов Гений Владимирович	д.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ51	Ульчиеков Михаил Андреевич		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП 03.04.02

Физика, магистратура

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные и компетенции</i>	
P ₁	Умеет самостоятельно обучаться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности
P ₂	Проявляет способность эффективно работать самостоятельно в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, быть лидером в команде, консультировать по вопросам проектирования научных исследований, а также быть готовым к педагогической деятельности.
P ₃	Умеет находить зарубежных и отечественных партнеров, владеет иностранным языком, позволяющим работать с зарубежными партнерами с учетом культурных, языковых и социально-экономических условий.
P ₄	Проявляет понимание используемых методов, области их применения, вопросов безопасности и здравоохранения, юридических аспектов, ответственности за профессиональную деятельность и ее влияния на окружающую среду.
P ₅	Следует кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научно-исследовательской деятельности
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P ₆	Проявляет глубокие естественнонаучные, математические профессиональные знания в проведении научных исследований в перспективных областях профессиональной деятельности.
P ₇	Принимает участие в фундаментальных исследованиях, а также в модернизации современных и создании новых методов

	изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств материалов.
P₈	Способен обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности
P₉	Способен применять полученные знания для решения нечетко определенных задач, в нестандартных ситуациях, использует творческих подход для разработки новых оригинальных идей и методов исследования.
P₁₀	Способен планировать проведение аналитических имитационных исследований по профессиональной деятельности с применением современных достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области научных исследований, умеет критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делает выводы, знает правовые основы в области интеллектуальной собственности.
P₁₁	Умеет интегрировать знания в различных и смежных областях научных исследований и решает задачи, требующие абстрактного и креативного мышления и оригинальности в разработке концептуальных аспектов проектов научных исследований

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 84 с., 15 рис., 4 табл., 33 источников, 2 прил.

Ключевые слова: тепловой «комфорт», теплоснабжение промышленных зданий, микроклимат производственных помещений.

Объектом исследования является теплоперенос в системе «объект теплоснабжения – слой теплоизоляции – окружающая среда».

Целью данной работы является математическое моделирование теплоотвода от работающего и установление численных значений температур воздуха (T_B), которые соответствуют условиям «теплого комфорта».

В процессе исследования проводилось математическое моделирование теплопереноса в системе «объект теплоснабжения – слой теплоизоляции – окружающая среда».

В результате исследования разработана одномерная математическая модель, получены распределения температур в данной системе.

Основные технологические характеристики: программная реализация одномерной математической модели, выполненная на языке высокого уровня типа Pascal.

Степень внедрения: результаты внедрены в учебный процесс.

Область применения: данное исследование может быть использовано для разработок систем отопления и вентиляции, одежды.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в разработке рекомендаций по разработке систем отопления.

В будущем планируется провести исследования с учетом параметров, таких как влажность воздуха, испарение с поверхности кожи, интенсивность работы и т.д.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Определения

В настоящей работе применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Испарение – это процесс фазового перехода жидкость-пар либо жидкость-воздух при подводе внешнего тепла.

Коэффициент теплоотдачи – характеризует интенсивность теплообмена, равен плотности теплового потока при градиенте температур равном единице.

Метаболическая теплота – теплота выделяемая внутри организма человека, в результате его жизнедеятельности.

Подкожно-жировая клетчатка – слой кожи, образованный жировой тканью.

Дерма – слой кожи, выполняющий опорную и трофическую функцию.

Эпидермис – многослойный производный эпителия, являющийся наружным слоем кожи.

Обозначения и сокращения

МСО – микроклимат систем охлаждения.

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина;

ТБ – техника безопасности;

ТБО – твердые бытовые отходы.

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий»;
2. СП 52.13330.2011. «Свод правил. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*»;
3. ГОСТ 12.1.006-84* «СБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля»;
4. СанПин 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях»;
5. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»;
6. СНиП 2.04.05-91 «Отопление, вентиляция и кондиционирование»;
7. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»;
8. ГОСТ 12.1.045-84 «СБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля»;
9. ГОСТ 12.4.124-83 «СБТ. Средства защиты от статического электричества»;
10. РД 39-22-113-78 «Временные правила защиты от проявлений статического электричества на производственных установках и сооружениях нефтяной и газовой промышленности»;
11. СНиП 3.05.06-85 «Электротехнические устройства»;
12. ГОСТ 1516.3-96 «Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции»;
13. СНиП 2.09.04.77 «Административные и бытовые здания»;

ОГЛАВЛЕНИЕ

Реферат.....	6
Введение.....	11
1. Современное состояние проблемы моделирования в системе «объект теплоснабжения – слой теплоизоляции – окружающая среда».....	12
2. Математическое моделирование в системе «объект теплоснабжения – слой теплоизоляции – окружающая среда».....	21
2.1 Постановка задачи с граничным условием первого рода при $x=0$	22
2.2 Постановка задачи с граничным условием второго рода при $x=0$	23
3. Результаты численного моделирования.....	27
3.1 Численный анализ исследований для задачи с граничными условиями 1-го рода при $x=0$	28
3.2 Численный анализ исследований для задачи с граничными условиями 2-го рода при $x=0$	35
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность ресурсосбережение..	
4.1 Определение перечня работ и оценка времени на их выполнение.....	38
4.2 Смета затрат на разработку проекта.....	41
4.2.1 Материальные затраты.....	42
4.2.2 Амортизация компьютерной техники.....	42
4.2.3 Заработная плата.....	42
4.2.4 Социальные отчисления.....	44
4.2.5 Прочие затраты.....	44
4.2.6 Накладные расходы.....	44
4.3 Заключение.....	45

5. Социальная ответственность.....	46
5.1 Производственная безопасность.....	48
5.1.1 Электробезопасность.....	49
5.1.2 Пожарная безопасность.....	50
5.1.3 Освещенность.....	52
5.1.4 Микроклимат в кабинете.....	53
5.1.5 Шум и вибрация в кабинете.....	55
5.2 Экологическая безопасность проекта.....	56
5.3 Безопасность при чрезвычайных ситуациях.....	57
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	59
5.5 Заключение.....	60
Основные результаты и выводы.....	61
Список публикаций студента.....	62
Список используемых источников.....	63
Приложение А Обзор литературы (на английском языке).....	67
Приложение Б Листинг программы в Pascal.....	84

ВВЕДЕНИЕ

Проблема энергосбережения является одной из приоритетных во многих отраслях экономики. Решение глобальной (по существу) задачи энергосбережения возможно только по результатам решения большого числа (нескольких сотен) конкретных задач снижения затрат энергии во всех отраслях промышленности и в социальной сфере. Одной из таких (возможно, относящихся к категории наиболее значимых) является задача формирования комфортного [1] для работающего микроклимата производственного помещения. Наиболее важным, возможно, параметром, определяющим в значительной мере степень «комфортности» микроклимата, является температура воздуха.

Разработка систем теплоснабжения помещений промышленных объектов проводится с использованием нормативных параметров [2,3] (температура воздуха, влажность, концентрация пыли и др.). Выбор параметров системы отопления, как правило, имеет целью достижение в помещении температур T_B , которые обеспечивают выполнения условий теплового «комфорта» [4] работающего – регламентный микроклимат. Выбор же значений температуры воздуха в помещении T_B проводится в основном «эвристически» (на основании большого опыта эксплуатации систем теплоснабжения для помещений различного назначения). При этом, как правило, просто постулируется, что комфортной для работающего является температура в диапазоне изменения от 18°C до 24°C [1]. Такой подход обеспечивает приемлемую для традиционных систем отопления технологию работы, без учета возможных индивидуальных характеристик основного объекта теплоснабжения – работающего и условий производства (интенсивность труда, наличие перерывов, тип одежды, режим работы вентиляционной системы, тип освещения и др.) В этой связи представляется целесообразным анализ процессов теплоотвода (охлаждения) от работающего и теоретическое обоснование принятых в настоящее время на

основании эмпирических данных об ощущениях работающего комфортных для последнего температур производственных помещений.

Целью данной работы является математическое моделирование теплоотвода от работающего и установление численных значений T_B , которые соответствуют условиям «теплого комфорта» [1].

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ современного состояния проблемы моделирования теплопереноса в системе «объект теплоснабжения – слой теплоизоляции – окружающая среда» и параметров микроклимата производственных помещений;
2. Разработка математической модели данной системы и ее численное решение;
3. Построение и анализ полученных зависимостей.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ «ОБЪЕКТ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ – СЛОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ – ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»

В настоящее время многие ученые связывают проблемы организма человека, такие как ожирение, нарушение обмена веществ и т.д. с нарушением его энергетического баланса [5]. По большей мере часть работ, связанных с решением данной проблемы направлена на изучение оптимального содержания питательных веществ [6]. Однако, не менее важную роль играет и теплообмен человека с окружающей средой [1], поэтому так важно изучение параметров микроклимата производственных помещений.

Вопрос о «тепловом комфорте» человека в современной литературе освещен весьма широко [7 – 30]. Но стоит отметить, что большая часть работ основывается на анализе «эмпирических» данных об ощущениях человека [7], а результатов математического моделирования не достаточно.

Стоит отметить, что в настоящее время параметры микроклимата определяются нормами СанПин 2.2.4.548 – 96, СП 60.1330.2012.

В статье [1] представлены результаты экспериментального исследования теплового «комфорта» человека. На группу людей с одинаковой одеждой устанавливались температурные датчики и в зависимости от их ощущений фиксировались данные комфортных температур воздуха T_B в помещениях и поверхности кожи T_{II} . Установлено, что при $T_B=21-24$ °C, средние $T_{II}=33-34$ °C для человека являются комфортными (рис. 1).

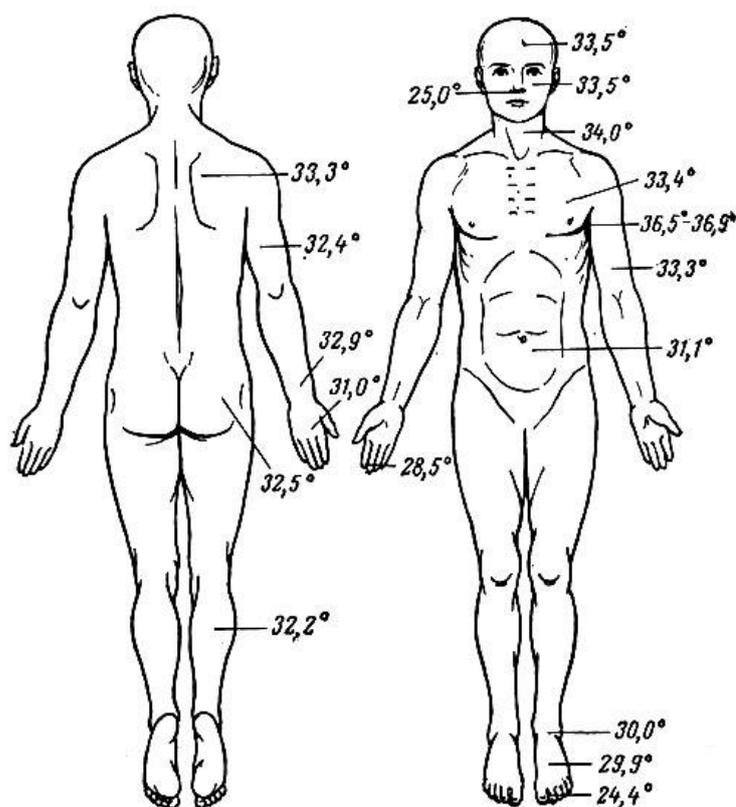


Рис. 1 – Температура поверхности кожи человека на различных участках

В работе [8] показаны «традиционные методы» расчета параметров микроклимата, которые сводятся к решению уравнения теплового баланса человека.

$$S = M - (\pm W \pm E \pm R \pm C);$$

где S – теплоаккумуляция тепла человека, M – метаболическая теплота, W – тепловой эквивалент механической работы, E – тепловыделение испарением, R – лучистое тепловыделение, C – конвективное тепловыделение.

Составляющие данного уравнения получены эмпирическим путем, или же на основе «общеизвестных» фактов. Данным методом можно достаточно точно определить «комфортные параметры» микроклимата производственных помещений, но этот способ имеет ряд недостатков (например не учитывается изменение температур поверхностей кожи и одежды, что существенно влияет на теплообмен человека с окружающей средой), и для более точного их нахождения необходимо математическое моделирование.

Примеры использования данного уравнения для различных условий представлены в работе [9]. При этом не учитывается изменение температуры

поверхности кожи, которая существенно влияет на величину теплового потока, отводимого от человека. В связи с этим представляется целесообразным использование предложенного авторами метода для обоснования «комфортной» температуры воздуха производственных помещений.

Целью исследования [10] является определение подходящих микроклиматических систем охлаждения (МСО) для снижения теплового стресса и улучшения работоспособности работников и их практичности в профессиональной сфере. Метаанализ был использован для обобщения, анализа и сравнения эффектов влияния различных МСО на работу человека с соответствующими физиологическими и психологическими реакциями, тем самым предоставляя обоснованные предложения по выбору подходящих МСО для профессиональных работников.

В статье [11] оцениваются микроклиматические условия в помещениях школ. Были проведены точечные и долгосрочные измерения для оценки микроклиматических условий (то есть температуры воздуха, относительной влажности, концентрации CO_2 и освещенности). Разработан инновационный многовариантный метод ранжирования в качестве возможного инструмента оценки строения здания для определения приоритетов технического обслуживания и ремонта. Проблема, на которую студенты жаловались больше всего, это тепловой режим в жаркий сезон. Более того, школа с худшими микроклиматическими условиями была также оценена как худшая по строительным и психологическим показателям.

Человеческие теплофизиологические модели вскоре смогут имитировать пространственные неоднородности в тепловой среде. В этой связи возрастает потребность в анатомически специфических коэффициентах конвективного и радиационного теплообмена для человеческого тела. В исследовании [12] использовался сочлененный термоманекен с 16 сегментами тела (голова, грудь, спина, предплечья, руки, таз, бедра, голени, стопы) для получения конвективных и радиационных коэффициентов теплоотдачи. Испытания проводились в диапазоне скоростей ветра от неподвижного воздуха до 5,0 м/с,

имитируя условия внутри помещений и на улице. Были исследованы как «стоячие», так и «сидячие» позы, а также восемь различных углов азимута ветра. Коэффициент радиационного теплообмена, измеренный для всего тела, составил $4,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для «сидячих» и «стоячих» случаев, что близко к общепринятому значению $4,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Аналогично коэффициент конвективного теплообмена для манекена составил $3,4$ до $3,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. В режиме принудительной конвекции коэффициенты теплоотдачи были выше для рук, ног и периферических конечностей по сравнению с центральной частью туловища. Направление ветра мало сказывалось на конвективной передаче тепла от отдельных сегментов тела.

В статье [13] представлена математическая модель теплообмена человека с окружающей средой, в которой учитывалась активная (сеть подкожных капилляров) и пассивная (жировая прослойка) теплоизоляция человека.

Авторы статьи [14] предлагают математическую модель в цилиндрической системе координат, где учитывается асимметрия теплового потока, обусловленная расположением органов в теле человека. Такой подход был разработан еще в 1998 г. Д. Фиалом [15]. Модели данных органов представляют собой эллиптические цилиндры (рис. 2):

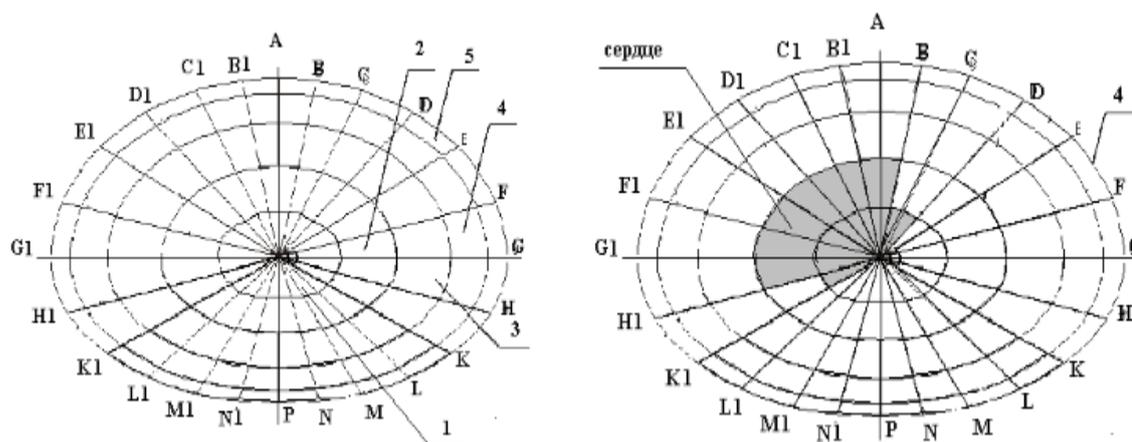


Рис. 2 – Схема поперечного сечения туловища человека по срезам. 1 – ядро, 2 – мышцы, 3 – жировой слой, 4 – кожа [15].

Данная схема, имеет большую степень достоверности и позволяет решать задачи, связанные с расчетом теплового состояния человека. Но она не учитывает особенностей строения тела человека и основного переносчика тепла по его организму (который очень сложно описать математически) – кровеносную систему.

Много работ направлено на изучения теплообмена человека в различных условиях. Авторы [16] рассматривают влияние внутренних источников тепла на процесс теплообмена организма человека с окружающей средой в процессе охлаждения, так как это играет большую роль в его терморегуляции.

Предложена модель [17], которая достаточно точно описывает терморегуляцию человека во время физических нагрузок. Исследование [17] демонстрирует диапазон «комфортных» температур, который становится шире при физических нагрузках.

Авторы статьи [18] разработали детальную модель терморегуляции организма, которая позволяет анализировать то, как долго человеческое тело может оставаться живым в экстремальных условиях (рассмотрена возможность использования этой модели на чемпионатах мира по нахождению в сауне).

Использование методов математического моделирования для анализа микроклимата помещений позволяет получать детальную информацию о распределении параметров по объему помещения, объективно сравнивать различные схемы организации воздухообмена [19]. Возможность исключения из системы определяющих уравнений радиационного теплообмена существенно сокращает трудоемкость задачи, делая использование математических методов более эффективными. Выделение всего тепла в виде конвективной составляющей рекомендуется [19] избегать, так как такой способ приводит к заметному искажению параметров конвективных струй над человеком, а также некоторому отклонению средних и максимальных значений температуры и скорости в рабочей зоне.

Еще одним направлением исследования терморегуляции организма человека является медицина. Температурное поле тела можно использовать в

качестве показателей физиологического состояния в диагностике заболевания и в процессе лечения [20]. В настоящее время широкое признание получают термовизуальные (термографические) методы диагностики, основанные на вариациях теплового поля кожи при наличии патологических очагов во внутренних органах. Термографические исследования в медицине в основном характеризуются бессимптомным подходом: диагноз ставится на основе субъективной интерпретации чисто визуальной картины термографического изображения. Биофизические механизмы формирования теплового поля на поверхности тела для большинства патологических нарушений во внутренних органах еще не изучены. Например, одной из наиболее важных проблем термовизуальной диагностики остается изменения температуры кожи в результате теплового потока, проникающего через «оболочку» из внутренних органов [20].

Математическая модель Столвика [21] описывает тепловое состояние человека как изолированного объекта, без одежды. Этот подход позволяет математически представить процесс теплообмена без учета внешних факторов, в том числе тепловых раздражителей. С точки зрения геометрического представления аналогичным образом рассматривается тело человека в других работах [22], где элементы тел представляют собой цилиндры различных параметров (рис. 3).

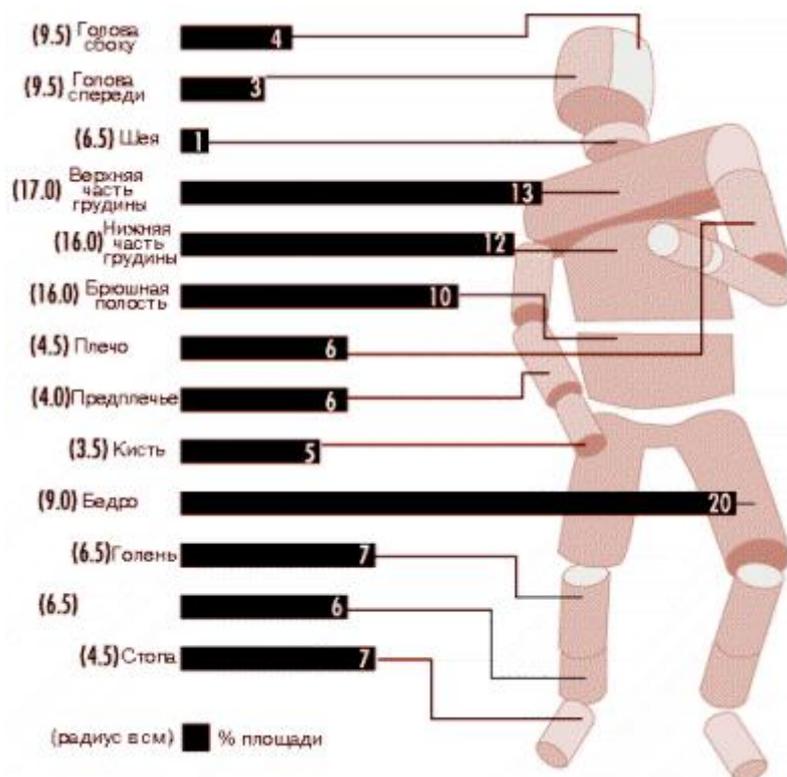


Рис. 3. – Модель человека в виде набора цилиндров

Одежда играет ключевую роль в способности тела адаптироваться к окружающей тепловой среде. Таким образом, критически важно иметь представление о влиянии свойств одежды и волокон на теплообменные процессы организма. С этой целью была разработана подробная модель теплопереноса [23] для анализа влияния нескольких характеристик текстиля (излучаемость внешней поверхности, извилистость и доля волокна) и свойств волокна (средство с водой, коэффициент диффузии воды в волокнах, теплопроводность, плотность, удельная теплоемкость) на тепло- и массообмен через многослойную одежду для разных интенсивностей выделения тепла/пота. Прогнозы температуры и влажности были подтверждены экспериментальными данными, полученными при измерениях устойчивости к испарению текстиля [24].

В статье [25] описан комбинированный метод численного моделирования воздушного потока, теплового излучения и переноса влаги для прогнозирования выделения тепла из организма человека. Потoki воздуха, температуры и влажности исследовались с помощью теории трехмерной

вычислительной гидродинамики. Использовалась модель с низким числом Рейнольдса в обобщенной криволинейной системе координат для представления сложной формы человеческого тела. Была применена двухузловая модель Gagge для моделирования процессов метаболического тепловыделения и терморегуляции в человеческом организме. Предсказанные результаты были очень близки к экспериментальным результатам в аналогичных условиях.

В статье [26] описывается математическая модель, разработанная для моделирования физических характеристик тепловой системы человека в переходном состоянии. В качестве исходных данных приняты физиологические параметры, такие как скорость местного метаболизма, локальные скорости кровотока и скорость потоотделения. Автоматическое вычисление этих параметров будет использоваться для изучения теплового регулирования человека. Для решения уравнения теплопроводности на компьютере Control Data Corporation 1604 использовались конечно-разностные методы. Поскольку применялись численные методы, в [26] модель включено гораздо больше факторов, чем в предыдущие. Тело было разделено на 15 геометрических областей: голова, грудная клетка, брюшная полость и проксимальные, медиальные и дистальные сегменты рук и ног. Осевыми градиентами в данном отрезке пренебрегали. В каждом сегменте большие артерии и вены были аппроксимированы артериальным и венозным бассейнами, которые были распределены радиально по всему сегменту. Учитывалось накопление тепла в крови больших артерий и вен, а также передача тепла от крупных артерий и вен к окружающей ткани. Венозные потоки собирались вместе в сердце, прежде чем вливаться в капилляры легких. Каждый из сегментов был разделен на 15 радиальных секций, что позволило обеспечить значительную свободу при выборе физических свойств, таких как теплопроводность и скорость кровотока в капилляры.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ «ОБЪЕКТ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ – СЛОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ – ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»

2.1 Постановка задачи с граничным условием первого рода при $x=0$;

Принято [5], что для здорового человека температура основной части тела T_1 может колебаться в относительно небольшом диапазоне от 35,5 до 37,4 °С (рис.5). При достижении температур, которые выходят за рамки данного диапазона, можно говорить о переохлаждении или перегреве работающего (что не соответствует условиям «теплового комфорта»).

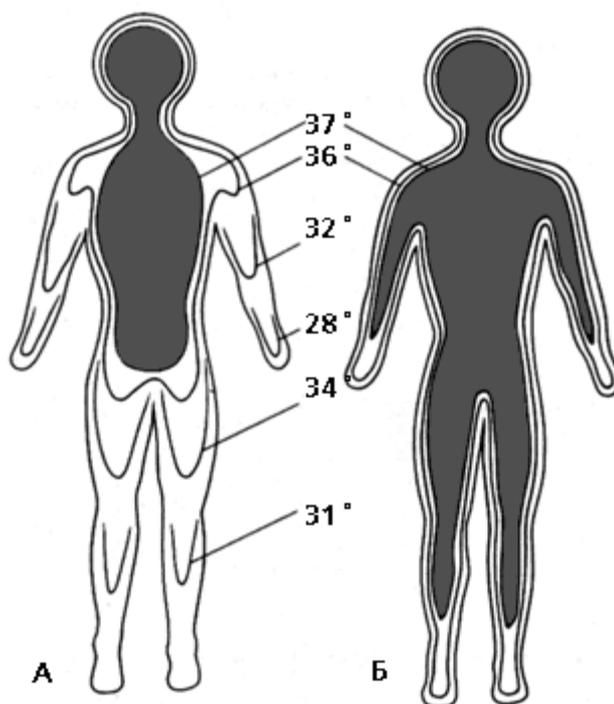


Рис. 5 – Температура различных областей тела человека в условиях холода (А) и тепла (Б)

При постановке задачи рассматривалась пятислойная (рис.6) (а при использовании дополнительного слоя одежды – семислойная) пластина (так как теплоотводы по другим координатам пренебрежимо малы). Область решения

включает: слой кожи, состоящего в свою очередь из слоев: подкожно-жировая клетчатка (толщиной Δ_1), дерма (толщиной Δ_2), эпидермис (толщиной Δ_3), воздушный зазор между кожей человека и одеждой Δ_4 , и в качестве внешнего теплоизолятора – одежда Δ_5 . Кожный покров внешним слоем тела к основной части человека, температура которого постоянна. На внешней поверхности одежды происходит теплообмен с окружающей средой, посредством естественной конвекции.

Предполагалось, что температура воздуха производственных помещений постоянна и не изменяется во времени ($T_B = \text{const}$), а теплообмен на внешней поверхности одежды происходит за счет естественной конвекции и теплового излучения.

В такой постановке задача сводится к определению температуры поверхности T_{Π} тела работающего при известных толщинах слоев (рис.6), теплоизоляционных свойствах материалов и веществ, а так же условий теплоотвода на внешней границе слоя теплоизоляции. Значение температуры T_{Π} и будет определять «комфортность» теплового режима работающего при определенной температуре внешней среды и интенсивности охлаждения. Сформулированная задача теплопроводности может решаться в одномерной постановке (перетоки теплоты по двум другим координатам будут пренебрежимо малы в большинстве практически значимых вариантов) для пятислойной пластины.

Следует отметить, что в общем случае возможно варьирование параметров рассматриваемой системы – как толщин отдельных слоев, так и теплоизоляционных характеристик материалов этих слоев.

Геометрия области решения приведена на рис. 6.

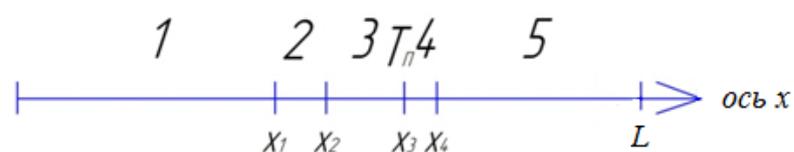


Рис.6 – Область решения задачи: 1) подкожно-жировая клетчатка; 2) дерма; 3) эпидермис; 4) воздушный слой; 5) теплоизоляция (одежда);

Математическая постановка задачи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad 0 < x < x_1; \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \quad x_1 < x < x_2; \\ \rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2}, \quad x_2 < x < x_3; \\ \rho_4 c_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2}, \quad x_3 < x < x_4; \\ \rho_5 c_5 \frac{\partial T_5}{\partial t} = \lambda_5 \frac{\partial^2 T_5}{\partial x^2}, \quad x_4 < x < L; \end{array} \right.$$

Здесь ρ_i , λ_i , c_i - плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость материала i -го слоя системы, T_i – текущее значения температуры ($i=1 \dots 5$).

На левой границе рассматриваемой системы (при $x=0$) принято условие постоянства температуры основной части тела работающего (граничные условия первого рода). На правой границе ($x=L$) задан теплообмен за счет естественной конвекции и излучения. На границах раздела между слоями записывались условия четвертого рода.

Начальные и граничные условия:

$$x = 0: T = T_1, T_1 = const;$$

$$x = x_1: \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, T_1 = T_2;$$

$$x = x_2: \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}, T_2 = T_3;$$

$$x = x_3: \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x}, T_3 = T_4;$$

$$x = x_4: \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} = \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x}, T_4 = T_5;$$

$$x = L: \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} = \alpha(T_L - T_B) + \varepsilon\sigma((T_L)^4 - (T_B)^4);$$

$$t = 0: T_1 = T_1^0, T_2 = T_2^0, \dots, T_{x1} = T_{x1}^0, \quad 0 < x < x_3;$$

$$T = T_0^e, \quad x_3 < x < x_4;$$

$$T = T_0^{od}, \quad x_4 < x < L;$$

Здесь α - коэффициент теплоотдачи, ε - приведенная степень черноты поверхности кожного покрова человека, σ - постоянная Стефана-Больцмана.

Коэффициент теплоотдачи находился по критериальным выражениям для условий естественной конвекции вблизи плоской стенки [26]:

$$Gr = \frac{\beta \cdot l^3 \cdot g \cdot (T_L - T_B)}{\nu};$$

где Gr – число Гразгофа, h – характерный размер (рост человека), ν - коэффициент кинематической вязкости (воздух), β – температурный коэффициент объемного расширения для воздуха.

При ламинарном режиме течения число Нусельта для воздуха определяется из соотношения ($10^{-3} < Gr \cdot Pr < 5 \cdot 10^2$) [27]:

$$Nu = 0,46 \cdot Gr^{0,25};$$

При переходном ($5 \cdot 10^2 < Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7$) [27]:

$$Nu = 0,46 \cdot Gr^{0,25};$$

При турбулентном ($Gr \cdot Pr > 2 \cdot 10^7$) [27]:

$$Nu = 0,133 \cdot Gr^{0,33};$$

Откуда [27]

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l};$$

Коэффициент теплоотдачи рассчитывался по критериальному выражению для условий естественной конвекции вблизи плоской стенки [27]:

$$Nu^{1/2} = 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}};$$

$$Ra = Pr \cdot Gr;$$

где Ra – число Релея.

Система дифференциальных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями решена методом конечных разностей, с использованием алгоритма [29,30], разработанного для решения задач теплопереноса в многослойных областях с разрывами коэффициентов теплопроводности.

При решении задачи зависимость теплофизических характеристик материалов и веществ слоев от температуры не учитывалась, так как изменение последней составляло всего от 1 К до 10 К.

Так же предполагалось, что объект находится в неподвижном состоянии (нет дополнительного внутреннего тепловыделения).

2.2 Постановка задачи с граничными условиями второго рода на границе $x=0$

Для анализа полученных результатов был рассмотрен вариант граничных условий при $x=0$ второго рода. задается тепловой поток [8]:

$$q = M / A;$$

где M – метаболическая теплота, уходящая через кожу человека, A – площадь поверхности тела.

Соответственно, при данной постановке математическая модель будет иметь вид:

$$\begin{cases} \rho_4 c_4 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_4 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, & 0 < x < x_1; \\ \rho_5 c_5 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_5 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, & x_1 < x < L; \end{cases}$$

$$x = x_2: \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} = \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x}, \quad T_1 = T_2;$$

$$x = 0: -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} = q_1; \quad q_1 = M / A;$$

$$x = L: \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} = \alpha(T_L - T_B) + \varepsilon\sigma((T_L)^4 - (T_B)^4);$$

$$t = 0: T = T_0^e, \quad x_3 < x < x_4;$$

$$T = T_0^{oo}, \quad x_4 < x < L;$$

На данном этапе исследования предполагалось, что человек находится в покое (теплота отводимая испарением мала[4]):

$$Q_u = 0,49 \cdot (M / A \cdot (1 - \eta) - 50);$$

где M – метаболическая теплота, A – площадь поверхности тела человека (поверхность Дюбуа), а M/A – для состояния покоя 50 Вт/м^2 .

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ФМ51	Ульчиеков Михаил Андреевич

Институт	Энергетический	Кафедра	теоретической и промышленной теплотехники
Уровень образования	магистратура	Направление	03.04.02 Физика

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов, амортизационные отчисления, заработная плата участников проекта.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Нормы амортизации, нормы премии по счету заработной платы.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Ставка по отчислениям во внебюджетные фонды.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	
2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет	
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ст. преподаватель	Кузьмина Наталья Геннадьевна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ51	Ульчиеков Михаил Андреевич		

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью выполнения данного раздела является экономическое обоснование научно–исследовательской работы. Оценка является комплексной и произведена в разрезе экономической эффективности, социальной значимости и других аспектов, т.к. проведение математического моделирования теплопереноса в системе «объект теплоснабжения – слой теплоизоляции – окружающая среда» требует привлечения финансовых затрат и других ресурсов, которые должны быть экономически оправданы и целесообразны.

4.1 Определение перечня работ и оценка времени на их выполнение

Планирование работ включает в себя: составление перечня работ; определение участников каждой отдельной работы; установление продолжительности работ.

Составим перечень работ, которые необходимо произвести для достижения цели. Сведения об этапах, их продолжительности и сотрудниках, работающих над выполнением проекта, представлены в таблице 4.1.

Над выполнением работы трудятся: НР – научный руководитель (16 разряд); И – инженер (10 разряд).

Таблица 4.1 – Определение перечня работ и оценка времени на их выполнение

№ п/п	Наименование работ	Исполн-ль	t, дн
1	Составление и утверждение технического задания	НР И	1
2	Оформление технического задания	И	1
3	Подбор теоретической информации (литература)	И	19
4	Разработка программного обеспечения: процесс теплопереноса с 1-м способом расчета коэффициента теплоотдачи	И НР	25 2
5	Разработка программного обеспечения: процесс теплопереноса с 2-м способом расчета коэффициента теплоотдачи	И НР	25 2
6	Разработка программного обеспечения: процесс	И	25

	теплопереноса с граничным условием 2-го рода на границе $x=0$	НР	2
7	Построение основных графических зависимостей	И	10
8	Сопоставление результатов математического моделирования с экспериментальными исследованиями	И	5
9	Анализ полученных результатов	И НР	4
10	Работа над разделом «Социальная ответственность»	И	5
11	Работа над разделом «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	И	5
12	Работа над заключительной частью	И	5
13	Оформление расчетно-пояснительной записки	И	5
14	Распечатка расчетно-пояснительной записки и демонстрационных листов	И	1
15	Проверка расчетно-пояснительной записки и исправление ошибок	И НР	2
16	Сдача расчетно-пояснительной записки руководителю	И	1
Итого		И НР	139 13

4.2 Смета затрат на разработку проекта

Суммарные затраты на разработку темы или договорная цена на выполнение работы будет рассчитываться по формуле:

$$K_{np} = K_{mat} + K_{ам} + K_{зн} + K_{со} + K_{пр} + K_{накл}, \text{ руб.} \quad (1)$$

где K_{mat} – материальные затраты, руб;

$K_{ам}$ – амортизация, руб;

$K_{зн}$ – заработная плата, руб;

$K_{со}$ – социальные отчисления, руб;

$K_{пр}$ – прочие затраты, руб;

$K_{накл}$ – накладные расходы, руб.

Рассмотрим каждую составляющую суммарных затрат в отдельности.

4.2.1 Материальные затраты

Затраты, связанные с закупкой расходных составляют $K_{mat} = 1000 \text{ руб.}$

Основная их часть идет за закупку бумаги и канцелярских товаров.

4.2.2 Амортизация компьютерной техники

Затраты, связанные с использованием компьютерной техники:

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.КТ}}{T_{кал}} \cdot Ц_{КТ} \cdot \frac{1}{T_{сл}}; \quad (2)$$

где $T_{исп.КТ}$ – время использования компьютерной техники,

$T_{кал}$ – количество дней в году,

$Ц_{КТ}$ – стоимость компьютерной техники (25 тыс. рублей),

$T_{сл}$ – срок службы компьютерной техники (примерно 5 лет).

Тогда:

$$K_{ам} = \frac{139}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 1890 \text{ руб.}$$

4.2.3 Заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научного руководителя (инженер 16 разряда) и исследователя (инженер 10 разряда) участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда.

Заработная плата участников проекта вычисляется по формуле:

$$K_{зп(инж)}^{мес} = ЗП_о \cdot k_1 \cdot k_2; \quad (3)$$

где $ЗП_0$ – месячный оклад, руб. (для инженера 10 разряда – 17000 руб., для инженера 16 разряда – 30000 руб.);

k_1 – коэффициент, учитывающий отпуск (10%);

k_2 – районный коэффициент (30%);

Тогда, заработная плата инженера (10 разряд):

$$K_{зп(инж)}^{мес} = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.},$$

Зарботная плата научного руководителя (16 разряд):

$$K_{зп(НР)}^{мес} = 30000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 42900 \text{ руб.},$$

Зарботная плата за количество отработанных дней по факту, рассчитывается по формуле:

$$K_{зп(инж)}^n = \frac{K_{зп}^{мес}}{21} \cdot n, \quad (4)$$

где 21 – количество рабочих дней в месяце

Тогда заработная плата за количество отработанных дней по факту для инженера 10 разряда:

$$K_{зп(инж)}^n = \frac{K_{зп(инж)}^{мес}}{21} \cdot n = \frac{24310}{21} \cdot 139 = 159751 \text{ руб.},$$

Тогда заработная плата за количество отработанных дней по факту для научного руководителя:

$$K_{зп(НР)}^n = \frac{K_{зп(НР)}^{мес}}{21} \cdot n = \frac{42900}{21} \cdot 13 = 26557 \text{ руб.},$$

Фонд заработной платы:

$$K_{зп}^n = K_{зп(инж)}^n + K_{зп(НР)}^n, \quad (5)$$

Тогда:

$$K_{зп}^n = 159751 + 26557 = 186308 \text{ руб.}$$

4.2.4 Социальные отчисления

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$K_{co} = k_{внеб} \cdot K_{зн}^n, \quad (6)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр., и равен 0,3).

$$K_{co} = 0,3 \cdot 186308 = 55892 \text{ руб.}$$

4.2.5 Прочие затраты

В эту статью включаются расходы по командировкам научного и производственного персонала, связанного с непосредственным выполнением конкретного проекта, величина которых принимается в размере 10% от основной и дополнительной заработной платы всего персонала, занятого на выполнении данной темы, материальных затрат и амортизации.

$$K_{пр} = 10\% (K_{mat} + K_{ам} + K_{зн} + K_{co}), \quad (7)$$

Тогда:

$$K_{пр} = 0,1 \cdot (1000 + 1890 + 186308 + 55892) = 24508 \text{ руб.}$$

4.2.6 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Накладные расходы составляют 200 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении работы по заданной теме.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$K_{накл} = k_{накл} \cdot K_{зн}^n, \quad (8)$$

где $k_{накл}$ – коэффициент накладных расходов.

Тогда:

$$K_{накл} = 2 \cdot 186308 = 372616 \text{ руб.}$$

Общая смета расходов на выполнение НИР сведена в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Смета расходов на выполнение НИР

№	НАИМЕНОВАНИЕ СТАТЕЙ	ВЕЛИЧИНА, РУБ
1	Материальные затраты	1000
2	Затраты на амортизацию компьютерной техники	1890
3	Заработная плата	186308
4	Социальные отчисления	55892
5	Прочие затраты	24508
6	Накладные расходы	372616
Себестоимость (С)		642214

4.3 Заключение

Тема данной работы является математическое моделирование теплопереноса в системе «объект теплоснабжения – слой теплоизоляции – внешняя среда» и параметров микроклимата производственных помещений.

В результате выполнения работы была решена задача теплопроводности для системы «объект теплоснабжения – слой теплоизоляции – внешняя среда», с учетом естественной конвекции и излучения на внешней границе одежды. Получены зависимости температуры поверхности кожи работающего от температуры воздуха внешней среды при различных толщинах слоев внешней изоляции, при различных наборах одежды и при различных теплофизических характеристиках материалов. Установлены толщины изоляции, соответствующие «комфортным» температурам окружающей среды.

Приведены температуры окружающей среды, соответствующие условиям «комфорта» для различных вариантов одежды в режиме естественной конвекции.

Данное исследование возможно использовать для разработок систем отопления, разработок одежды поэтому потенциальные клиенты: коммерческие организации, заинтересованные в минимизации своих расходов:

- теплоснабжающие компании;
- компании по проектировке систем отопления и вентиляции;
- предприятия занимающиеся разработкой одежды.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА

1. Ulchiekov M., A. Experimental Study of Heat Transfer in the Steam Thermal Siphon Tube Channel// MATEC Web Conf., Volume 72, 2016, pp. 4.
2. Ulchiekov M., A. Mathematical Modeling Of Heat Transfer in the System “The Object Of Heating – Thermal Insulation Layer – The External Environment” and Microclimate Parameters of Industrial Premises// MATEC Web Conf., Volume 72, 2016, pp. 6.
3. Ulchiekov M., A., Bulba E. E. Theoretical substantiation choice of “comfortable” air temperature in industrial premises// MATEC Web Conf., Volume 92, 2017, pp. 7.