

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический
Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника
Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование вязкого течения рабочего тела по круглому каналу УДК 621.1.016.7:532.001.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Г	Монич Юрий Олегович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Борисов Б.В.	д.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Попова С.Н.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Василевский М.В.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2016 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ

Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника

Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ТПТ

Кузнецов Г.В.

(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группы	ФИО
5БМ4Г	Моничу Юрию Олеговичу

Тема работы:

Исследование вязкого течения рабочего тела по круглому каналу

Утверждена приказом ректора (номер, дата)

№101 55/с от 28.12.2015

Срок сдачи студентом выполненной работы:

30.05.2016 г.

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.).

Рассматривается круглый канал постоянного сечения с заданными размерами, в котором происходит течение вязкого рабочего тела. Также рассмотрен процесс инжектирования

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(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).</i></p>	<p>-Введение; -Аналитический обзор литературных источников по схожей тематике; -Постановка задачи исследования; -Математическое моделирование вязкого течения в канале круглого сечения; -Математическое моделирование течения двухфазного потока по каналу круглого сечения -Анализ полученных результатов работы; -Заключение.</p>
<p>Перечень графического материала</p>	<p>Презентация 17 слайдов</p>

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Попова Светлана Николаевна</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Василевский Михаил Викторович</p>
<p>часть ВКР на иностранном языке</p>	<p>Кобенко Юрий Викторович</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Введение</p>	
<p>Постановка задачи</p>	
<p>Описание используемого метода</p>	
<p>Анализ результатов</p>	
<p>Заключение</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>01.10.2014</p>
--	-------------------

Задание выдал руководитель:

<p>Должность</p>	<p>ФИО</p>	<p>Ученая степень, звание</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>профессор</p>	<p>Борисов Б.В.</p>	<p>д.ф.-м.н.</p>		

Задание принял к исполнению студент:

<p>Группа</p>	<p>ФИО</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>5БМ4Г</p>	<p>Монич Юрий Олегович</p>		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа включает 123 страниц, 27 рисунков, 6 таблиц, 50 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: численное моделирование, вязкое течение, канал, режимы течения.

Объектом исследования является канал круглого сечения.

Целью работы является численное моделирование вязкого течения рабочего тела по каналу круглой формы с учетом изменения режимов течения.

В процессе исследования проводилось математическое моделирование.

В результате исследования разработан программный комплекс.

Область применения: устройства топливно-энергетического комплекса, создание наукоемких технологий в химической и металлургической промышленности.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2016, и редакторе формул Math Type, для расчетов и выполнения графиков использовалась программы Pascal ABC, Origin Pro 9.1, Corel Draw X3, Microsoft Excel 2016.

Содержание

Введение.....	10
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ РАБОЧИХ ТЕЛ В КАНАЛАХ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ	12
1.1 Особенности и области применения моделирования течения в каналах...	12
1.2 Численные методы моделирования течения в каналах.....	15
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ТЕЧЕНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА В КАНАЛЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ	16
2.1 Общая физическая постановка задачи.....	16
2.2 Математическая постановка задачи.....	16
3 ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ.....	19
3.1 Описание алгоритма программы.....	19
3.2 Основные этапы программной реализации.....	20
3.2.1 Задание расчетной сетки.....	20
3.2.2 Интегрирование уравнений.....	25
3.2.3 Решение уравнения энергии.....	38
3.2.4 Задание полей скоростей и давления.....	50
3.2.5 Задание граничных условий.....	58
3.3 Полученные результаты	75
3.4 Верификация полученных результатов	79
4 АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗУЕМОГО МЕТОДА НА ПРИМЕРЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ПО КАНАЛУ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ.....	79
4.1 Физическая постановка задачи	79
4.2 Математическая постановка задачи	80
4.3 Полученные результаты	82
5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	86
5.1 Оценка инновационного потенциала НИР.....	86
5.2 Определение этапов работы, трудоемкости работы, составление плана-графика.....	87
5.3 Составление сметы затрат.....	93

5.4 Расчет нарастания технической готовности работ	99
6 Социальная ответственность	102
6.1 Анализ вредных факторов проектируемой производственной среды	104
6.1.1 Воздействие электромагнитного поля на оператора ПЭВМ	104
6.1.2 Освещение	104
6.1.3 Микроклимат помещения	108
6.1.4 Источники шума	112
6.2 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды.....	113
6.2.1 Электробезопасность при работе на ПЭВМ	113
6.2.2 Пожарная безопасность.....	115
6.2.3 Региональная безопасность.....	116
6.3 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	116
6.4 Выводы.....	119
Заключение	120
Список использованной литературы	122
Приложение А	129

Введение

Изучение течений жидкостей и газов в каналах играет важную роль во многих отраслях техники, и поэтому представляет значительный интерес. В связи с современными требованиями к объектам различных производств актуальным становится вопрос оптимизации затрат на их проектирование и эксплуатацию. В настоящее время наиболее актуальным способом улучшения подобного рода конструкций является моделирование происходящих в них процессов при помощи программных комплексов с последующим выбором оптимальных параметров конструкций и протекающих в них сред.

Цель работы заключается в численном моделировании вязкого течения рабочего тела по каналу круглой формы с учетом изменения режимов течения.

Научная новизна работы заключается в создании новых и совершенствовании уже существующих методик расчета, позволяющих расширить круг решаемых задач.

Практическая значимость заключается в том, что проведенные исследования позволяют использовать данный подход для создания расчетных методик предварительной оценки характеристик каналов и трубопроводов различного назначения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», а также на V Международной научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2015», где был получен диплом III степени.

Публикации. Основные результаты диссертации в виде тезисов размещены на сайте конференции и приняты для опубликования в сборнике трудов вышеуказанной конференции.

Содержание работы

Первая глава отражает современные тенденции в области моделирования процессов течения рабочих тел в каналах.

Вторая глава посвящена физической постановке задачи, а также выбору математической модели для описания процессов течения в каналах круглого сечения с учетом реальных свойств рабочего тела. Рассматривается моделирование термодинамических параметров потока и варианты моделирования гидравлического и теплового взаимодействия со стенками канала. Рассмотрен используемый для решения полученной системы уравнений численный метод.

В третьей главе рассмотрены особенности программной реализации используемого численного метода. Приводится общий алгоритм, а также способы программной реализации граничных условий, аппроксимации отдельных членов уравнений, задание расчетной сетки.

Четвертая глава посвящена решению задачи моделирования течения двухфазного потока в канале цилиндрической формы с использованием разработанного программного комплекса. Проанализированы полученные результаты при различных параметрах процесса инжектирования.

В заключении подведены основные итоги проведенных исследований.

1 Современное состояние моделирования течений рабочих тел в каналах круглого сечения.

1.1 Особенности и области применения и моделирования течения в каналах.

В среде исследований течений особый интерес представляют области течения, которые относятся к процессам, протекающим в каналах, технологических трубопроводах, газопроводах и паропроводах.

В силу особенностей конструкции, проходящих внутри нее процессов, проектирование подобных конструкций требует довольно больших затрат, поэтому весьма актуален вопрос совершенствования конструкции энергетическом и эксплуатационном планах.

Непосредственный подбор оптимальных элементов конструкций при проектировании устройств носит весьма затратный характер, как материальных, так и физических.

С появлением ЭВМ появилась возможность моделирования процессов, протекающих в вышеуказанных объектах, соответственно, как альтернатива непосредственному подбору элементов конструкций представляет кардинально более экономичный и менее трудозатратный способ проектирования объектов.

В настоящий момент существует масса программных комплексов, которые позволяют моделировать широкий спектр процессов, и условий в которых они протекают. Основной недостаток подобного рода комплексов – необходимость в навыках работы с конкретным типом программного обеспечения, что в производственных условиях зачастую нецелесообразно в плане временных затрат. Данного недостатка лишены объектно-ориентированные программные комплексы, работающие по принципу «ввод-вывод». Использование подобного рода программ значительно упрощает процесс получения результатов, что позволяет сэкономить на трудовых, временных и материальных затратах.

В связи с непрерывным повышением требований к рабочим параметрам объектов, вовлеченных в различного рода технологические процессы, так или иначе связанные с течениями рабочих тел в каналах, в целях совершенствования их эффективности возникает насущная необходимость во все более точном математическом моделировании этих процессов.

Прогностическая способность выбранной методики расчета основных характеристик исследуемых конструкций во многом определяется физической адекватностью выбранной модели рабочего тела.

О потребности в математическом моделировании процессов тепломассообмена и термодинамических параметров могут свидетельствовать немалое количество публикаций.

Так, например, в работе [1] Путем численного решения задачи был реализован метод контрольных объемов. При решении задачи были получены рекомендации по выбору количества сеточных узлов и параметров сгущения сетки в зависимости от выбора процедур аппроксимации конвективных членов и метода решения уравнения Пуассона.

В работе [2] представлены результаты исследования влияния параметров вычислительных процедур на точность определения характеристик и структуры течения вязкой несжимаемой теплопроводной жидкости вблизи поверхности стенок круглого канала постоянного сечения. Для описания газодинамики и тепломассопереноса в газовой фазе использована система уравнений Навье-Стокса для сжимаемого вязкого газа.

В работе [3] представлен численный анализ процесса испарения капель воды с различными начальными координатами, размерами, скоростями, температурами при инжектировании в поток насыщенного или перегретого пара, движущегося по цилиндрическому каналу с постоянным массовым расходом. Течение жидкости описывается системой стационарных уравнений Навье–Стокса. Движение и тепловое состояние капли описывается уравнением движения в поле скоростей установившегося течения газа с учетом сил вязкого сопротивления и силы тяжести и уравнением теплопроводности в сферической

системе координат, которые дополняются начальными условиями и граничными условиями.

В работе [4] Представлена математическая модель течения реальной жидкости в канале со многими усложняющими факторами. Описаны особенности алгоритма. Приведены различные результаты численного моделирования течения в трубе.

В работе [5] представлены результаты моделирования и расчета прямооточных и закрученных ламинарных и турбулентных неизотермических течений вязких сред в устройствах, включающих секции с постоянной и переменной по длине площадью поперечного сечения. Детально исследуются гидродинамика и теплообмен закрученного потока по методу локальной крутки в области непосредственного входа в опытный участок и в условиях вращения стенки вокруг своей продольной оси. При моделировании турбулентного переноса импульса и тепла используются современные схемы замыканий второго порядка с дифференциальными уравнениями для тензора рейнольдсовых напряжений.

В работе [6] приводится метод решения нестационарной задачи о движении однородной вязкой несжимаемой жидкости в разветвляющемся канале, вызванном разностью давлений на его входах выходах. Метод основан на использовании аппроксимации решаемой системы на входах-выходах канала для вычисления значений скоростей и многошаговой итерационной схемы для нахождения давления внутри области решения. Приводятся результаты численного решения двумерных и трехмерных задач.

Проанализировав доступные работы по термодинамическим свойствам, по уравнениям состояния рассматриваемого рабочего тела, была выбрана модель, подробно описанная в работе [2]. Непосредственный алгоритм использования этой модели будет раскрыт во второй главе.

1.2 Численные методы моделирования течения рабочего тела в каналах.

Параметры течения зависят не только от выбранной модели, а также от уравнений, описывающие параметры течения, поля основных характеристик потока, которые выбираются для описания как сжимаемой, так и несжимаемой жидкости. Параметры течения находятся из уравнения движения, замыкается оно уравнениями неразрывности и энергии, а объединяет эти уравнения выбранная процедура определения термодинамических параметров согласно уравнению состояния.

Все эти уравнения являются сложными нелинейными и нахождение аналитического решения в общем случае крайне затруднительно или даже невозможно. Поэтому традиционно для моделирования таких сложных течений используются численные методы.

Например, в работе [9] приводятся результаты анализа алгоритма, основанного на методах конечных элементов (МКЭ) и конечного объема (МКО), использующих неструктурированные сетки (триангуляция в случае 2D, разбиение на тетраэдры в случае 3D). Наиболее подробно рассмотрена задача моделирования внутренних течений, описываемых уравнениями Навье - Стокса в приближении пограничного слоя; в этом случае параболический характер уравнений позволяет, аппроксимируя производную по параболической координате, производить расчет трехмерной задачи маршевым проходом по области, на каждом сечении которой решается система из трех эллиптических уравнений, нелинейных по коэффициенту и правой части (уравнения движения), и одного уравнения первого порядка (уравнение неразрывности). Для уравнений движения был осуществлен переход к самосопряженной форме и реализован МКЭ в постановке Ритца, использующий линейные базисные функции на треугольниках.

2 Постановка задачи течения рабочего тела в канале круглого сечения.

2.1 Общая физическая постановка задачи.

Для моделирования среды выбирается объект в виде канала круглого сечения с определенной длиной и диаметром. (рисунок 2.1.1). Осуществляется подача в трубу некой массы газа либо жидкости, обладающей соответствующими энергетическими параметрами. канал заканчивается выходом в большой объем. Исходя из рассмотрения практических задач, течение полагается существенно дозвуковым.

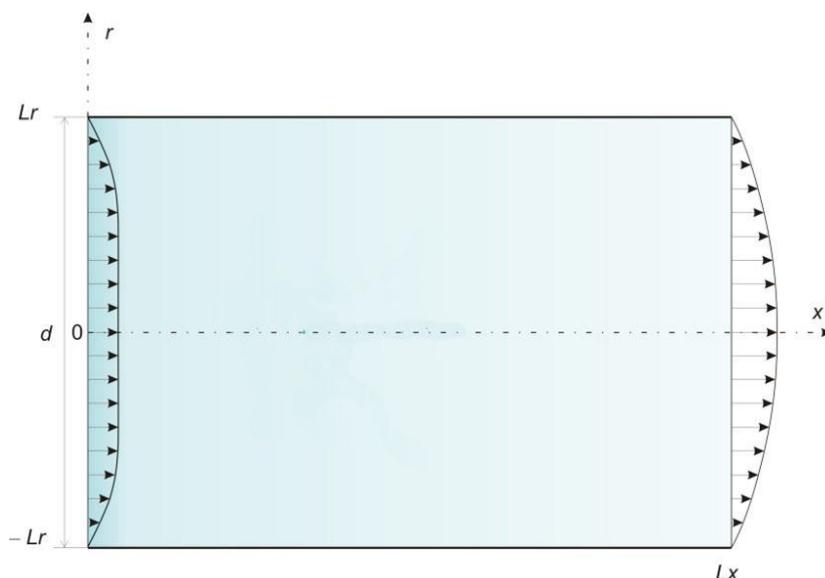


Рисунок 2.1.1 Область решения рассматриваемой задачи.

При данных допущениях для описания процесса движения и нахождения этих параметров были привлечены нестационарные дифференциальные уравнения (система уравнений), которая используется для моделирования течения рабочего тела по выбранной конструкции канала [2]. Это уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v r}{\partial r} = 0, \quad (2.1.1)$$

где ρ – плотность, кг/м³;

u, v – горизонтальная и вертикальная компоненты скорости, м/с;

Уравнения движения для вязкой жидкости: Уравнения Навье-Стокса для симметричного относительно оси потока:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho u v r}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (2.1.2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho v v r}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{\partial P}{\partial r} - \rho T g, \quad (2.1.3)$$

где P – давление, Па;

μ – коэффициент динамической вязкости, Па•с;

g – ускорение свободного падения, м/с²

При рассмотрении течения, в качестве начальных условий задается скорость на входе в канал, температура, при этом течение на входе считается безвихревым, а скорость и температура постоянны. На выходе из канала задавались «мягкие» граничные условия, тепловой поток.

Считается, что поступление рабочего тела происходит слева $x = 0$. Для дозвукового втекания в канал необходимо задать два граничных условия, из которых достаточно физически адекватными и хорошо реализованными на практике будут скорость, температура на входе в канал:

$$x = 0, -Lr \leq r \leq Lr : u(x, r) = u_{in}, v(x, r) = 0, T(x, r) = T_{in}; \quad (2.1.4)$$

Истечение происходит на «правом конце» при $x = Lx$ и дозвуковое истечение моделируется заданием теплового потока на выходе:

$$x = Lx, -Lr < r < Lr : \frac{\partial u(x, r)}{\partial x} = 0, \frac{\partial v(x, r)}{\partial x} = 0, \frac{\partial T(x, r)}{\partial x} = 0; \quad (2.1.5)$$

На стенках канала задаются условия прилипания и адиабатичности:

$$0 < x < Lx, r = -Lr : u(x, r) = 0, v(x, r) = 0, \frac{\partial T(x, r)}{\partial r} = 0; \quad (2.1.6)$$

$$0 < x < Lx, r = Lr : u(x, r) = 0, v(x, r) = 0, \frac{\partial T(x, r)}{\partial r} = 0. \quad (2.1.7)$$

4 Анализ используемого метода на примере решения задачи моделирования течения двухфазного потока по каналу круглого сечения.

4.1 Физическая постановка задачи

Для моделирования среды выбирается объект в виде канала круглого сечения с определенной длиной и диаметром. (рисунок 4.1.1). Осуществляется подача в трубу некой массы газа либо жидкости, обладающей соответствующими энергетическими параметрами. канал заканчивается выходом в большой объем. Помимо этого, в канал производится инжектирование капель воды. Исходя из рассмотрения практических задач, течение полагается существенно дозвуковым.

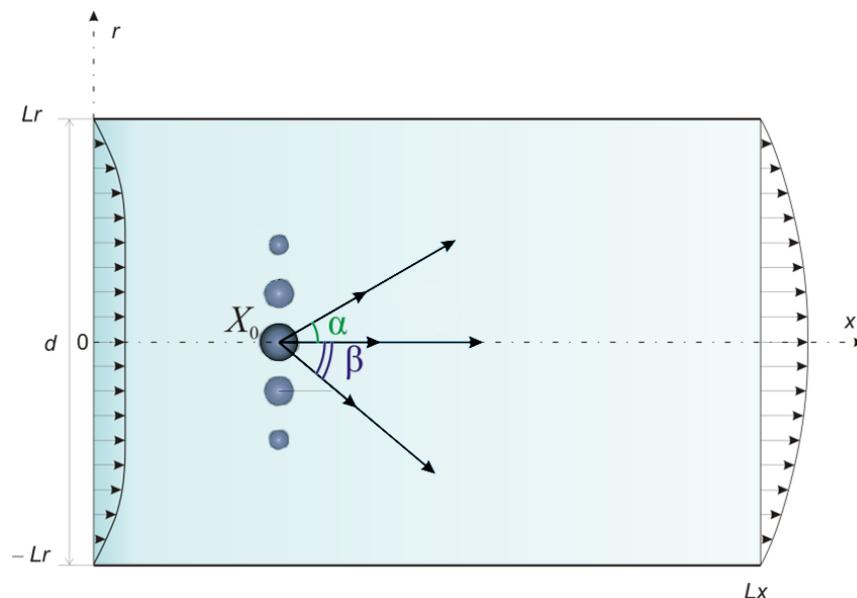


Рисунок 4.1.1 - Область решения рассматриваемой задачи.

При данных допущениях для описания процесса движения и нахождения этих параметров были привлечены нестационарные дифференциальные уравнения (система уравнений), которая используется для моделирования течения рабочего тела по выбранной конструкции канала (рассмотрена в главе 2).

Движение каплей, инжектируемых в поток описывается уравнением движения в поле скоростей установившегося течения газа с учетом сил вязкого сопротивления и силы тяжести и уравнением теплопроводности в сферической

системе координат, которые дополняются начальными условиями и граничными условиями :

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{3\rho_g}{4\rho_p d_p} C_D |U - V_p| U - V_p - g \quad (4.1.1)$$

$$\frac{dX_p}{dt} = V_p \quad (4.1.2)$$

$$\rho_p c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{1}{r_p^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_p r_p \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) \quad (4.1.3)$$

Соответственно начальные условия для скорости, координаты и температуры частицы задавались следующим образом:

$$\mathbf{V}_p|_{t=0} = \mathbf{V}_0 \quad (4.1.4)$$

$$X_p|_{t=0} = X_0 \quad (4.1.5)$$

$$T_p(0) = T_{inj} \quad (4.1.6)$$

Граничные условия для инжектируемой частицы имеют следующий вид:

$$t > 0, r_p = 0: \frac{\partial T_p}{\partial r_p} = 0, \quad (4.1.7)$$

$$t > 0, r_p = \frac{d_p(t)}{2}: \lambda_p r_p \frac{\partial T_p}{\partial r} = \alpha_f t \cdot T_f - T_p \quad (4.1.8)$$

Закон сопротивления задавался на основании формулы Шиллера-Неймана:

$$C_D d_p(t) = \begin{cases} C_D^{Stokes} d_p(t) \cdot 1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687} d_p(t) , \text{Re}_p \leq 10^3 \\ C_D^{Stokes} d_p(t) \cdot 1 + 0.11 \text{Re}_p d_p(t) / 6 , \text{Re}_p > 10^3 \end{cases} \quad (4.1.9)$$

В случае обтекания сферической частицы коэффициент теплоотдачи определяется на основании соотношения:

$$\alpha_f t = \text{Nu}(t) \cdot \frac{\lambda_f}{d_p t} \quad (4.1.10)$$

Число Нуссельта и число Прандтля определяется зависимостью Ранца-Маршала:

$$\text{Nu } t = (2 + 0.6 \cdot \text{Re}_p^{1/2} d_p(t) \cdot \text{Pr}_f^{1/3}) \quad (4.1.11)$$

$$\text{Re}_p d_p(t) = \frac{\rho_f \cdot d_p(t) \cdot |\mathbf{U} - \mathbf{V}_p|}{\mu_f} \quad (4.1.12)$$

$$\text{Pr}_f = \frac{\mu_f c_{pf}}{\lambda_f} \quad (4.1.13)$$

Скорость испарения G_p с поверхности капли описывается соотношением Кнудсена-Ленгмюра:

$$G_p t = a \frac{P_S^a - P_{stat}^a}{\sqrt{2\pi \frac{R}{M} T_p d_p(t) / 2}}, \quad (4.1.14)$$

где \mathbf{a} – коэффициент испарения (аккомодации), \mathbf{P}_{Sa} , \mathbf{P}_{Stata} – соответственно абсолютное давление капли в состоянии насыщения и абсолютное статическое давление среды окружающую каплю, \mathbf{R} – универсальная газовая постоянная, \mathbf{M} – молекулярная масса молекулы капли, \mathbf{T} – температура поверхности капли.

Изменение диаметра капли вследствие испарения определяется зависимостью:

$$\frac{d_p t}{dt} = \frac{G_p(t)}{\rho_p(T(t)) \cdot S_p(t)}. \quad (4.1.15)$$

$$S_p(t) = \pi d_p^2(t). \quad (4.1.16)$$

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела работы является технико-экономическое обоснование научно-исследовательских работ (НИР). Оно проводится с целью определения и анализа трудовых и денежных затрат, направленных на реализацию НИР, а также уровня научно-технической результативности НИР.

В рамках данной работы НИР включает в себя выбор математической модели для описания динамики различных сред в канале круглого сечения, а также реализация данной задачи при помощи программных сред. При выполнении численного исследования использовалась среда программирования ABC Pascal. На основе проведенной НИР оформлена диссертационная работа в пакете программ Microsoft Office 2016.

Для достижения поставленных целей данного раздела поставлены следующие задачи [1]:

- Оценка инновационного потенциала
- Определение этапов работы, трудоемкости работы, составление плана графика
- Составление сметы затрат
- Расчет нарастания технической готовности и целесообразности НТИ

Первоначально производится организация и планирование работ, в которые включается определение этапов работы и их трудоемкости.

5.1 Оценка инновационного потенциала НИР

Течение различных сред по каналам круглого сечения – процесс весьма распространенный в объектах топливно-энергетического комплекса,

химической и металлургической промышленности и иных отраслях. Особенности физики движения и изменения различных физических параметров рабочих тел представляют большой интерес при проектировании различных инженерных сооружений и устройств

В связи с этим проводится много научных исследований, так или иначе затрагивающих изучение процессов течения различных сред в каналах определенной геометрии.

В данной работе проведено численное исследование течения вязких рабочих тел по каналам круглого сечения различной длины и диаметра. В результате работы был создан программный вычислительный комплекс для численного моделирования данных процессов.

5.2 Определение этапов работы, трудоемкости работы, составление плана-графика

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо оптимально спланировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

На начальном этапе составляется полный перечень работ, определяются их исполнители и оптимальная продолжительность. Результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта. Наиболее удобным, простым и наглядным способом для этих целей является использование линейного графика. Для его построения составляется перечень работ с продолжительностью их выполнения, результаты сводятся в таблицу 5.2.1. Основные исполнители в проекте: инженер (И) и научный руководитель (НР).

Таблица 5.2.1 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Формулирование задачи	НР	100%
Составление технического задания на проект	НР	90%
	И	10%
Поиск и изучение литературы	НР	20%
	И	80%
Разработка календарного плана	НР	80%
	И	20%
Разработка общего алгоритма программного комплекса	НР	35%
	И	65%
Реализация алгоритма в среде программирования	НР	10%
	И	90%
Отладка полученного программного комплекса	И	100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	100%
Подведение итогов – сравнение полученных результатов с желаемыми	НР	40%
	И	60%

Перейдем к расчету продолжительности этапов работ, который осуществляется опытно-статистическим методом, который реализуется вероятностным способом. Для определения ожидаемого значения продолжительности работ $t_{ож}$ и других величин воспользуемся следующими формулами (5.2.1 – 5.2.4)[1].

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5} \quad (5.2.1)$$

где t_{\min} – минимальная трудоемкость работ, чел/дн.;

t_{\max} – максимальная трудоемкость работ, чел/дн.

Для построения линейного графика требуется осуществить расчет длительности этапов в рабочих днях, а затем перевести в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях, $T_{рд}$ ведется по формуле

$$T_{рд} = \frac{t_{ож}}{K_{вн}} \cdot K_{\delta} \quad (5.2.2)$$

где $t_{ож}$ – трудоемкость работы, чел/дн.;

$K_{вн}$ – коэффициент выполнения работ ($K_{вн} = 1$);

K_{δ} – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсации и согласование работ $K_{\delta} = 1, 2$.

Расчет продолжительности этапа в календарных днях, $T_{кд}$ ведется по формуле

$$T_{кд} = T_{рд} \cdot T_{к} \quad (5.2.3)$$

где $T_{к}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности, $T_{к}$ рассчитывается по формуле:

$$T_{к} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вд} - T_{пд}}, \quad (5.2.4)$$

где $T_{кал}$ – календарные дни ($T_{кал} = 365$);

$T_{вд}$ – выходные дни ($T_{вд} = 52$);

$T_{пд}$ – праздничные дни ($T_{пд} = 12$).

$$T_k = \frac{365}{365 - 52 - 12} = 1,213$$

В таблице (5.2.2) приведены длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе. На основании таблицы (5.2.1) составим линейный график работ и представим его на рисунке (5.2.1).

Таблица 5.2.2 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Длительность работ, чел/дн.			
					ТРД		ТКД	
		t_{\min}	t_{\max}	$t_{\text{ож}}$	НР	И	НР	И
Формулирование задачи	НР	2	4	2,8	3,36	–	4,08	–
Составление технического задания на проект	НР, И	2	3	2,4	2,59	0,29	3,14	0,35
Поиск и изучение литературы	НР, И	12	15	13,2	3,17	12,67	3,84	15,37
Разработка календарного плана	НР, И	2	4	2,8	2,69	0,67	3,26	0,82
Разработка алгоритма в программном комплексе	НР, И	8	15	10,8	3,89	9,07	4,72	11,00
Реализация алгоритма в программном комплексе	НР, И	18	25	20,8	1,25	23,71	1,51	28,76
Анализ результатов численного исследования	И	15	20	17	–	20,40	–	24,75
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	10	15	12	–	14,40	–	17,47
Подведение итогов	НР, И	4	7	5,2	2,50	3,74	3,03	4,54
Итого:				87	19,44	84,96	23,58	103,06

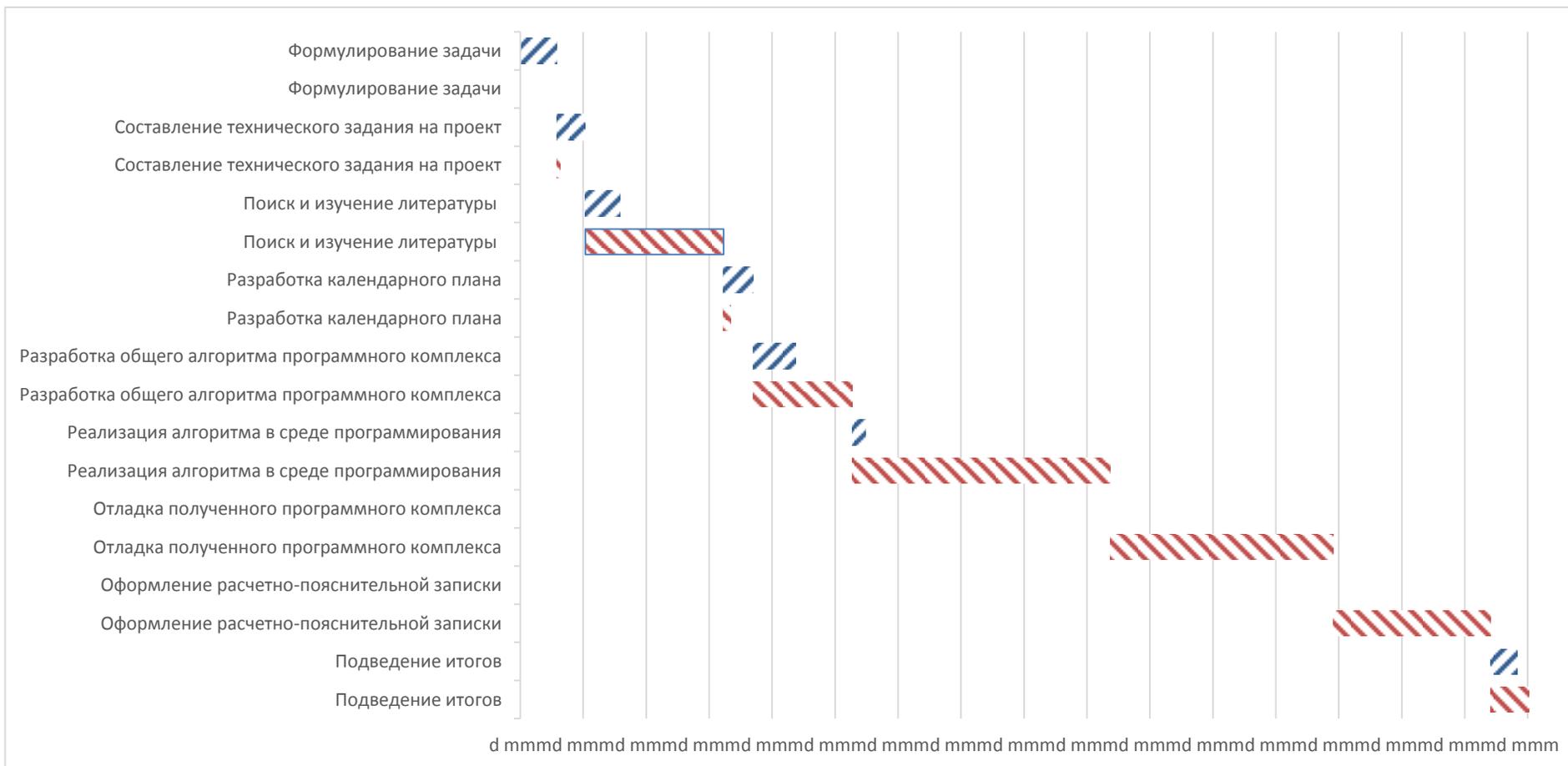


Рисунок 5.2.1 - Линейный график работ на основе рассчитанного для инженера и научного руководителя времени ТКД

5.3 Составление сметы затрат

Оценим затраты на материалы. К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ. Цена материальных ресурсов определяется по средней рыночной стоимости на 2016 год по соответствующим ценникам и приведена в таблице (5.3.1).

Таблица 5.3.1 – Расходные материалы [2], [3], [4]

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Офисная техника			
Компьютер	28999	1	28999
Клавиатура	599	1	599
Мышка	590	1	590
Принтер	5990	1	5990
Офисная мебель			
Стол	3500	1	3500
Стул	1200	1	1200
Программное обеспечение			
Windows 10	7900	1	7900
Microsoft Office 2016	17299	1	17299
Итого:	66077		

Расходы на материалы составили $C_{\text{мат}} = 66077$ руб.

Следующей статьёй расходов НИР для оценки является заработная плата исполнителей. Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$\text{Дневная з. пл} = \frac{\text{Месячный оклад}}{25,08 \text{ дней}}, \quad (5.3.1)$$

Расчет затрат на основную заработную плату приведен в таблице 5.3.2.

Таблица 5.3.2 – Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./день	Затраты времени, дни	К	Фонд з/платы, руб.
НР	33 162,87	1 322,28	24	1,4	44 429
И	14 874,45	593,08	104	1,4	86 352
Итого:			130 781		

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили $ЗП_{\text{осн}} = 130\,781$ руб. При расчете учитывалось, что в году 301 рабочий день и, следовательно, в месяце 25,08 рабочих дня. Затраты времени на выполнение работы по каждому исполнителю брались из таблицы (5.2.2). Также был принят во внимание коэффициент, учитывающий коэффициент по премиям $K_{\text{ПР}} = 0,1$ и районный коэффициент $K_{\text{РК}} = 0,3$. Итоговый коэффициент ($K = 1 + K_{\text{ПР}} + K_{\text{РК}} = 1 + 0,1 + 0,3 = 1,4$).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы [1], используемые формулы (5.3.2 – 5.3.12) взяты [1]

$$ЗП_{\text{доп}} = 0,15 \cdot ЗП_{\text{осн}}, \quad (5.3.2)$$

$$ЗП_{\text{доп}} = 0,15 \cdot 130\,781 = 19\,617,15 \text{ руб.}$$

Фонд заработной платы:

$$\Phi ЗП = ЗП_{\text{осн}} + ЗП_{\text{доп}}, \quad (5.3.3)$$

$$\Phi ЗП = 130\,781 + 19\,617,15 = 150\,398,15 \text{ руб}$$

Расчет отчислений от фонда оплаты труда

Затраты по этой статье составляют отчисления по единому социальному налогу (ЕСН).

Отчисления по заработной плате определяются по следующей формуле:

$$С_{\text{соц}} = К_{\text{соц}} \cdot \Phi ЗП, \quad (5.3.4)$$

где $К_{\text{соц}}$ – коэффициент, учитывающий размер отчислений из заработной платы. Данный коэффициент составляет 27% от затрат на заработную плату.

$$С_{\text{соц}} = 0,27 \cdot 150\,398,15 = 40\,607,5 \text{ руб.}$$

Перейдем к расчету затрат на электроэнергию. Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию при работе оборудования а также затраты на электроэнергию, потраченную на освещение. Затраты на электроэнергию при работе оборудования для технологических целей $\mathcal{E}_{\text{об}}$ рассчитываются по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{об}} = P_{\text{об}} \cdot Ц_{\mathcal{E}} \cdot t_{\text{об}}, \quad (5.3.5)$$

где P_{OB} – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$C_{\text{Э}}$ – тарифная цена за 1 кВт·час, принимаем $C_{\text{Э}} = 2,15$ руб/кВт · час;

t_{OB} – время работы оборудования, час.

Время работы оборудования вычисляется на основе данных для T_{RD} таблицы 2 для инженера из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов

$$t_{OB} = T_{RD} \cdot 8, \quad (5.3.6)$$

$$t_{OB} = 85 \cdot 8 = 680 \text{ час.}$$

Мощность, потребляемая оборудованием P_{OB} , принимаем равную мощности блока питания компьютера и монитора

$$P_{OB} = P_{БП} + P_M, \quad (5.3.7)$$

$$P_{OB} = 0,4 + 0,1 = 0,5 \text{ кВт,}$$

$$\text{Э}_{OB} = 0,5 \cdot 2,15 \cdot 680 = 731 \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию для освещения помещения, где осуществлялось выполнение проекта Э_{OC} , рассчитываются по формуле

$$\text{Э}_{OC} = P_{OC} \cdot C_{\text{Э}} \cdot t_{OC}, \quad (5.3.8)$$

где P_{OC} – мощность, потребляемая осветительными приборами, кВт;

t_{OC} – время работы осветительных приборов, час.

Мощность, потребляемая освещением P_{OC} , определяется по формуле

$$P_{OC} = P_{уст.OC} \cdot K_C, \quad (5.3.9)$$

где $P_{уст.OC}$ – установленная мощность осветительных приборов,

принимаем $P_{уст.ос} = 1,28$ кВт;

K_C - коэффициент спроса для внутреннего освещения, принимаем $K_C = 0,9$.

$$P_{ос} = 1,28 \cdot 0,9 = 1,15 \text{ кВт.}$$

Время работы освещения $t_{ос}$, час, определяется по формуле

$$t_{ос} = t_{сут} \cdot T, \quad (5.3.10)$$

где $t_{сут}$ – длительность работы освещения за смену, час;

T – время, затраченное на проведение работ,

принимаем $T = 85$ дней.

$$t_{ос} = 5 \cdot 85 = 425 \text{ час,}$$

$$\mathcal{E}_{ос} = 1,15 \cdot 2,15 \cdot 425 = 1\,050,81 \text{ руб.}$$

Общие затраты на электроэнергию \mathcal{E} , руб, определяются по формуле

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{об} + \mathcal{E}_{ос}, \quad (5.3.11)$$

$$\mathcal{E} = 731 + 1\,050,81 = 1\,781,81 \text{ руб.}$$

Следующим этапом расчёта затрат является расчет амортизационных расходов

Амортизационные отчисления рассчитываются на время использования ЭВМ по формуле

$$C_{ам} = \frac{N_A \cdot Ц_{об}}{F_D} \cdot t_{вт}, \quad (5.3.12)$$

где N_A – годовая норма амортизации,

принимаем $N_A = 25\%$;

$C_{\text{ОБ}}$ – цена оборудования,

исходя из таблицы 5.3.1. принимаем $C_{\text{ОБ}} = 28999$ руб.;

$F_{\text{Д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени,

принимаем $F_{\text{Д}} = 2416$ часов;

$t_{\text{ВТ}}$ – время работы вычислительной техники при создании программного продукта, по таблице 10 $t_{\text{ВТ}} = 104 \cdot 8 = 832$ час.;

$$C_{\text{АМ}} = \frac{0,25 \cdot 28999}{2416} \cdot 832 = 2\,496,6 \text{ руб.}$$

Для оценки не учтённых в предыдущих статьях расходов рассчитаем прочие расходы [1].

Прочие расходы составляют 16 % от единовременных затрат на выполнение технического продукта и проводятся по формуле:

$$C_{\text{ПРОЧ}} = C_{\text{МАТ}} + C_{\text{ОСН}} + C_{\text{СОЦ}} + Э + C_{\text{АМ}} \cdot 0,16, \quad (5.3.13)$$

$$\begin{aligned} C_{\text{ПРОЧ}} &= 66077 + 130781 + 40607,5 + 1781,81 + 2496,6 \cdot 0,16 = \\ &= 38679 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Определим общую себестоимость НИР путем сведения рассчитанных статей расчета в смету (таблица 5.3.3).

Таблица 5.3.3 – Смета затрат на НИР

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
1	2	3
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{МАТ}}$	66077

Фонд оплаты труда	$C_{\text{ОСН}}$	130 781
Отчисления из ФОТ	$C_{\text{СОЦ}}$	40 607,5
Расходы на электроэнергию	Э	1 781,81
Амортизационные отчисления	$C_{\text{АМ}}$	2 496,6
Работы, выполняемые сторонними организациями	$C_{\text{СТОП}}$	–
Прочие расходы	$C_{\text{ПРОЧ}}$	38679
Итого:		280422,91

Таким образом, расходы на НИР составили: $C = 280422.91$ руб.

5.4 Расчет нарастания технической готовности работ

Следующим этапом является расчет нарастания технической готовности работ. Величина нарастания технической готовности работы H_i показывает на сколько процентов выполнена работа на каждом этапе. Данная величина вычисляется по формуле (5.4.1) [1]:

$$H_i = \frac{t_{H_i}}{t_0} \cdot 100\%, \quad (5.4.1)$$

где t_{H_i} - нарастающая трудоемкость с момента начала работы i -го этапа;

t_0 - общая трудоемкость.

Общая трудоемкость t_0 , вычисляется по формуле (4.4.2) [1]:

$$t_0 = \sum_{i=1}^n t_{\text{ОЖ}_i}, \quad (5.4.2)$$

где $t_{ож_i}$ - ожидаемая продолжительность i-го этапа.

Удельный вес каждого этапа $У_i$ определяется по формуле (5.4.3) [1]:

$$У_i = \frac{t_{ож_i}}{t_0} \cdot 100\%. \quad (5.4.3)$$

Результаты вычислений $Н_i$ и $У_i$ отражены в таблице 5.4.1.

Таблица 5.4.1 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

	Этап	Н _i , %	У _i , %
1	Формулирование задачи	3,22	3,22
2	Составление технического задания на проект	5,98	2,76
3	Поиск и изучение литературы	21,15	15,17
4	Разработка календарного плана	24,37	3,22
5	Разработка общего алгоритма программного комплекса	36,78	12,41
6	Реализация алгоритма в программном комплексе	60,69	23,91
7	Анализ полученных результатов численного исследования	80,23	19,54
8	Оформление расчетно-пояснительной записки	94,02	13,79
9	Подведение итогов	100,00	100,00

Таким образом, мы видим процесс нарастания технической готовности вплоть до полного выполнения с течением времени по ходу последовательного выполнения определенных этапов.

В данном разделе работы определены этапы и трудоемкость работ, составлены план-график и смета затрат, произведен расчет нарастания технической готовности программного комплекса. Программный комплекс завершен на 100% и готов к использованию.

Согласно смете затрат, расходы на НИР составили $C = 280422.91$ руб.

Данный проект является экономически эффективным, так как при затратах около трехсот тысяч рублей позволяет спрогнозировать динамику различных сред в различных инженерных сооружениях, в частности скорость, давление, температуру и другие характерные для каждой из сред параметры, и тем самым выбрать оптимальные параметры для рабочей среды, а также параметры канала.

Очевидно, что затраты на разработку математической модели, позволяющей смоделировать процессы течения различных сред в каналах, незначительны по сравнению с возможными расходами необходимыми на непосредственный подбор оборудования при проектировании.

Список публикаций

1. Борисов Б.В., Маслов Е.А., Жуков А.С., Жарова И.К., Мониц Ю.О., Бадмаев А.Б. Параметрические исследования влияния условий втекания двухфазного потока на процесс испарения капель в канале // Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий». – Томск: НиТПУ. –2015.

2. Мониц Ю.О. Параметрические исследования влияния условий втекания двухфазного потока на процесс испарения капель в канале. // Материалы V Международной научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики». – Томск НиТГУ– 2015.