

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

направление – Физика

Кафедра Теоретической и промышленной теплотехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Использование метода С.К.Годунова для моделирования гидродинамики метана в состоянии насыщения или близком к состоянию насыщения

УДК 662.767:532,5,001.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ41	Скрябинский Дмитрий 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	Фигурко А.А.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич О.А.	к.б.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

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

направление – Физика

Кафедра Теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) _____ (Дата) Кузнецов Г. В.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5ФМ41	Скрябинскому Дмитрию Олеговичу

Тема работы:

Использование метода С.К.Годунова для моделирования гидродинамики метана в состоянии насыщения или близком к состоянию насыщения

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

31.10.16

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.).

Объект исследования – проточные каналы теплообменных устройств и сети для транспортировки метана.

Предмет исследования – природный газ (метан) обладающий свойствами реальности газа.

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).	Проведение обзора научных публикаций по тематике состояния моделирования процессов в проточных каналах, а также основных свойств, областей применения и моделирования процессов метана . Разработка математической модели исследования, реализация программы на языке высокого уровня. Анализ полученных данных при численном моделировании.
Перечень графического материала	Презентация (14 сл.)
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Фигурко А.А.
Социальная ответственность	Антоневич О.А.
Раздел на иностранном языке	Крайнов А.В.
Название разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение	
Глава 1. Современное состояние моделирования процессов в проточных каналах	
1.1 Основные свойства, области применения и моделирование процессов метана	
Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	25.09.2014 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ41	Скрябинский Дмитрий Олегович		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП 03.04.02

«ФИЗИКА»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Общекультурные (универсальные) компетенции</i>	
P1	Понимать необходимость самостоятельного обучения и повышения квалификации в течение всего периода профессиональной деятельности.
P2	Проявлять 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.
P3	Уметь находить зарубежных и отечественных партнеров, владеть иностранным языком, позволяющим работать с зарубежными партнерами с учетом культурных, языковых и социально-экономических условий.
P4	Проявлять понимание используемых методов, области их применения, вопросов безопасности и здравоохранения, юридических аспектов, ответственности за профессиональную деятельность и ее влияния на окружающую среду.
P5	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научно-исследовательской деятельности.
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P6	Проявлять глубокие естественнонаучные, математические профессиональные знания в проведении научных исследований в перспективных областях профессиональной деятельности.
P7	Принимать участие в фундаментальных исследованиях и проектах в области физики металлов и материаловедения, а также в модернизации современных и создании новых методов изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств твердых тел.
P8	Уметь обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, иметь передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности.
P9	Применять полученные знания для решения нечетко определенных задач, в нестандартных ситуациях,

	использовать творческий подход для разработки новых оригинальных идей и методов исследования в области физики металлов, материаловедения и термообработки.
P10	Планировать проведение аналитических имитационных исследований по профессиональной деятельности с применением современных достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области научных исследований, уметь критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы, знать правовые основы в области интеллектуальной собственности.
P11	Уметь интегрировать знания в различных и смежных областях научных исследований и решать задачи, требующие абстрактного и креативного мышления и оригинальности в разработке концептуальных аспектов проектов научных исследований.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа в форме магистерской диссертации 168 с., 21 рис., 26 табл., 49 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: численное исследование, тепломассообмен, теплообменник, фазовые переходы, метан, метод С.К. Годунова, реальное уравнение состояния, термодинамические свойства.

Объектами исследования являются проточные каналы теплообменных устройств и сети для транспортировки метана.

Цель работы - численное моделирование течения метана в условиях теплового и гидравлического взаимодействия со стенками каналов, фазовых переходов с учетом его реальных свойств.

В процессе исследования были проведены численные исследования, моделирующие процессы, происходящие в реальных теплообменных устройствах газовой промышленности.

В результате исследования определены основные параметры функционирования теплообменного оборудования в условиях стационарного течения рабочего тела по каналу.

Технологические и технико-эксплуатационные характеристики: численное моделирование реализуется на языке высокого уровня –Pascal ABC, визуализация результатов проведена с использованием пакета программ Origin Pro 9.1.

Область применения: энергетика (транспортировка, ожижение и регазация природного газа).

Экономическая эффективность/значимость работы разработка научных основ, позволяющих создать энергоэффективные теплообменные аппараты.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 12.0.003 – 74 Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
2. ГОСТ 12.1.005 – 88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
3. ГОСТ 1516.3-96 Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.
4. ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
5. ГОСТ 12.4.011–89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.
6. ГОСТ 12.1.045–84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.
7. ГОСТ 12.1.006-84* ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.
8. ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения.
9. ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

Определения

В данной работе применены следующие термины:

Двухфазный поток: Совместное течение нескольких фаз, включающее два разнородных компонента.

Фазовый переход: Переход вещества из одной термодинамической фазы в другую при изменении внешних условий.

Испарение: Процесс фазового перехода вещества из жидкого состояния в парообразное или газообразное, происходящий на поверхности вещества.

Обозначения и сокращения

СПГ – сжиженный природный газ;

МКР – метод конечных разностей;

НТИ – научно-техническое исследование;

ПДК – предельно допустимая концентрация;

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина;

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	11
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ОБЛАСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНЫХ КАНАЛАХ.....	14
1.1 Основные свойства, области применения и моделирование процессов метана	14
1.2 Моделирование течения рабочего тела	18
1.3 Численные методы моделирования параметров течения рабочего тела	21
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ТЕПЛООБМЕННИКАХ – ИСПАРИТЕЛЯХ ИЛИ КОНДЕНСАТОРАХ.....	27
2.1 Физическая постановка задачи	27
2.2 Моделирование термодинамических параметров потока	29
2.3.1 Моделирование гидравлического взаимодействия	32
2.3.2 Моделирование теплового взаимодействия.....	35
ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.....	40
3.1 Особенности алгоритмов расчета термодинамических величин.....	40
3.2 Выбор численного метода расчета для параметров течения.....	41
ГЛАВА 4 ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МЕТАНА В ГАЗООБРАЗНОМ/ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ	45
4.1 Исследование течения метана в газообразном состоянии.....	45
ГЛАВА 5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	59
5.1. Предпроектный анализ.	59
5.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования.	59
5.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	60
5.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	64
5.5. Планирование управления научным проектом.....	66
5.5.1 Контрольные события проекта.	66
5.5.2. План проекта.....	67
5.6. Бюджет научного исследования.....	72

5.7. Расчет нарастания технической готовности работ	78
ГЛАВА 6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	83
Введение.....	83
6.1 Производственная безопасность	83
6.1.1.1 Электромагнитное излучение	84
6.1.1.3 Микроклиматические условия работы в помещениях	86
6.1.2 Опасные физические производственные факторы	88
6.2 Экологическая безопасность.....	92
6.2.1. Защита атмосферы	93
6.2.2. Защита литосферы.....	94
6.2.2.2. Методы по снижению воздействия, вызванного образованием отходов:	95
6.2.3. Защита гидросферы.....	95
6.2.3.1. Методы по снижению воздействия на поверхностные воды и водные объекты:.....	95
6.2.3.2. Методы по снижению воздействия на подземные воды:	95
6.3.Безопасность в чрезвычайных ситуациях	97
6.3.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	99
6.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ	106
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	107
Приложение А	113
Приложение Б.....	139

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день сжиженный природный газ (СПГ) играет всё более важную роль на мировом рынке углеводородов. Увеличение потребления СПГ обусловлено не только дефицитом или отсутствием собственных запасов энергетических ресурсов в различных странах, но прежде всего рядом преимуществ СПГ, по сравнению с другими энергоносителями. А именно:

- при сжижении плотность газа увеличивается в сотни раз, что сказывается на повышении эффективности, и удобстве хранения, потребления энергоносителя, а также упрощает транспортировку.

- осуществление межконтинентальных перевозок СПГ по средствам танкеров-газовозов. Перевозка в цистернах - железнодорожным и автомобильным транспортом .

- газификации объектов сжиженным природным газом, удаленных от магистральных трубопроводов на дальние расстояния, по средствам создания резервных захоронений СПГ конкретно у потребителя, исключая строительство дорогих систем трубопровода.

- сжиженный природный газ – является нетоксичной криогенной жидкостью. Хранение таковой осуществляется в теплоизолированных емкостях при температуре -162°C . Большие объемы СПГ хранятся в специальных подземных, а также наземных резервуарах.

Изучение процессов тепломассобомена в таких резервуарах играет важную роль во множестве отраслей техники, привлекающих значительный интерес.

В силу серьезных требований, предъявляемым к рабочим параметрам машин и аппаратов химических производств, для расчета и совершенствования процессов и технологий переработки метана необходимы данные, главным образом, о его термодинамических свойствах при высоких температурах и давлениях.

Получение точных данных о калорических и термических свойствах природного газа при низких температурах, в частности о свойствах жидкой

фазы, для последующего проектирования резервуаров и емкостей глубокого холода, для хранения метана.

Цель работы заключается в проведении численного исследования процессов тепло- и массообмена в резервуарах и/или емкостей в фазовых переходах с учетом реальных свойств рабочего тела.

Научная новизна работы представляется в моделировании течения метана в широком температурном диапазоне, с учетом уравнения состояния и реальных термодинамических свойств рабочего тела.

Практическая значимость представляется в том, что проведенные исследования допускают использование данного подхода, в целях создания расчетных методик предварительной оценки характеристик теплообменного оборудования, как для ожижения газа, так и для регазации, или же для его продолжительного хранения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий».

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

Содержание работы.

Первая глава отражает современные тенденции в области моделирования процессов в проточных каналах.

Вторая глава посвящена созданию математической модели процессов тепломассообмена с учетом уравнения состояния и реальных свойств рабочего тела. Представлены физическая, геометрическая и математическая постановки задачи. Рассматривается моделирование термодинамического потока, его параметров и варианты моделирования гидравлического и теплового взаимодействия со стенками емкости.

В третьей главе представляются особенности численной реализации математической модели. Представлен анализ используемого численного метода, его применение непосредственно, для решения полученной системы уравнений.

Четвертая глава представляет параметрическое исследование течения метана в газообразном/жидком состоянии без учета и с учетом влияния трения о стенки канала, теплообмена с ограждающими конструкциями и комплексно. Проанализированы особенности полученных результатов расчетов течения потока и влияние теплового и гидравлического взаимодействия.

В заключении приведены основные итоги проведенных исследований.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ОБЛАСТИ

МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНЫХ КАНАЛАХ

1.1 Основные свойства, области применения и моделирование процессов метана

Охлажденный впоследствии очистки от примесей, природный газ, достигая температуры конденсации, равной $-161,5^{\circ}\text{C}$, превращается в жидкость, которая имеет название – сжиженный природный газ (СПГ). Объем газа при таком сжижении уменьшается в 600 раз, что является главным преимуществом данной технологии. Производство СПГ осуществляется на ожижительных установках (заводах СПГ), после чего имеется возможность перевозки его на специализированном транспорте – морских танкерах или ж/д-, авто- цистернах.

Это позволяет доставлять газ в труднодоступные районы, удаленные от магистральных газопроводов, обычно используемые для транспортировки СПГ. Также имеется возможность создавать продолжительные запасы природного газа, так как он долго хранится. Перед тем, как поставить СПГ непосредственно потребителю, его возвращают в первоначальное газообразное состояние на регазификационных терминалах. СПГ является самым безопасным и экологически чистым из используемых в настоящее время видов топлива. Это дает ему перспективу, перед другими видами топлива. Российской Федерацией решены вопросы транспортировки криогенных продуктов практически на любое расстояние железнодорожным и автомобильным транспортом, а также по трубопроводам (до 1 км). Разработаны трубопроводы для криогенных продуктов разных типоразмеров с внутренними диаметрами до 400 мм, криогенная, дистанционно управляемая, арматура различных диаметров, газовые редукторы и пневмоцилиндры с дистанционно управляемой арматурой, созданы высокоэффективные теплообменные аппараты, машинное оборудование центробежные насосы, вакуумные насосы, эжекторные установки и др, приборы, необходимые для обеспечения безопасности работ с

криогенными продуктами, с дистанционной передачей показаний на пульт управления. В настоящее время СПГ используется в отраслях:

- ракетно - космической техники
- авиации
- железнодорожного транспорта
- автомобильного транспорта
- водного транспорта
- для газификации удаленных населенных пунктов
- сельскохозяйственного производства
- покрытия пиковых нагрузок газопотребления
- использования холода, получаемого при газификации СПГ

В отличие от транспортировки «классическим» трубопроводным методом, требующий больших затрат и длительного времени для прокладки магистрали, сжиженный метан обладает следующими преимуществами:

- вероятность хранения с небольшим избыточным давлением с температурой, примерно равной 112К;
- СПГ не токсичная криогенная жидкость, также не способствует коррозии металлов;
- отличается высокой калорийностью, в сравнении с другими видами топлива;
- возможность хранения больших объемов СПГ, при атмосферном давлении, в специально оборудованных наземных резервуарах.
- эффективность и практичность хранения, транспортировки и потребления (природного газ в процессе сжижение увеличивает плотность в 600 раз);
- потенциал газификации объектов, удаленных от магистральных сетей газопровода;
- факт низкой температуры кипения - гарантия полного испарения СПГ при самых низких температурах окружающего воздуха;
- применение в качестве топлива для двигателей.

На сегодняшний день в России имеются все возможности – как научная база, так и технические мощности для внедрения и обширного использования сжиженного природного газа в хозяйственной отрасли страны.

Главной причиной в ускорении деятельности по использованию природного газа, выступает то, что дислокация крупных месторождений природного газа находятся в отдаленных районах России, строительство «классических» транспортных трубопроводов, в которых, является трудноосуществимым.

Этот факт обуславливает необходимость строительства заводов СПГ на месторождениях.

В связи с повышенным вниманием к рабочим параметрам теплообменных аппаратов, вовлеченных в технологические процессы по изменению состояния метана (ожижение и регазацию), в целях совершенствования их эффективности возникает необходимость в точном математическом моделировании этих процессов. В целях экономии материальных, временных ресурсов, произведена замена физического эксперимента на его численный аналог, что благоприятно сказывается на конкурентоспособности проектируемых конструкций.

Прогностическая способность выбранной методики расчета основных характеристик исследуемых конструкций во многом определяется физической адекватностью выбранной модели рабочего тела. Особенно это касается состояния насыщения и близких к ней областей термодинамических параметров, при которых рабочее тело может находиться как в однофазном, так и в двухфазном состоянии, что уже не может быть описано моделью идеального газа.

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

Так, например в работе [1] рассмотрена задача расчета с помощью единого метода значения термодинамических свойств газообразного и жидкого

метана от тройной точки до 1000K в интервале давлений от 0,1 до 1000 бар. Для такого расчета составлено уравнение состояния, постоянные которого определены на основании опытных термических данных.

В работе [2] были определены параметры потенциала позволяющие с достаточной для практического применения точностью определять термодинамические свойства метана в однофазной области, так же и на линии равновесия фаз. Для описания межмолекулярного взаимодействия метана был использован модельный потенциал Кара-Коновалова.

В работе [3] рассматривается подобие термодинамических свойств углеводородов в сверхкритической области параметров состояния. Предложен критерий термодинамического подобия, который вводит учет структуры молекулы и характера молекулярного взаимодействия вблизи критической точки. Описан численный метод расчета изобарной теплоемкости углеводородов и реализующая его программа. Реализована проверка предлагаемых корреляций имеющимися экспериментальными данными.

В работе [4] представлены сравнительные корреляции непосредственно связывают термодинамические свойства с молекулярной структурой и предлагается минимальный объем экспериментальных данных, для расчета. Основа рассматриваемого метода, для расчета изобарной теплоемкости охватывает описание барической или температурной зависимости этого свойства, для широко изученного, экспериментальным образом, вещества (эталонного). После, для определения поправок для исследуемого вещества, для этого устанавливается, или же уточняется коррелирующий параметр. Термодинамические свойства веществ в газовой фазе в большей степени имеют зависимость от структуры молекул. Вследствие, для основательного прогнозирования термодинамических и некоторых свойств, зависящих от молекулярной структуры, необходимо произвести предварительный анализ для связи «структура – свойство».

В работе [5] предложена простая модель для оценки критических значений температуры, давления и объема алканов по нормальной температуре

кипения и молекулярной массе углеводородов. Модель разработана с использованием ряда Тейлора в форме полиномиальной функции нормальной температуры кипения и просчитана для метана. Расчетные коэффициенты получены в виде линейной функции молекулярной массы. Показано, что эти параметры могут быть получены по регрессии между экспериментальными данными и результатами, полученными с использованием предлагаемой модели. Сравнением с данными для предыдущих моделей показано, что рассматриваемая модель может быть использована для оценки критических свойств алканов.

В работе [6] описаны соотношения для теплофизических свойств жидкой фазы метана, а также для двухфазной и газообразной. Соотношения основываются по средствам критической оценки имеющихся экспериментальных данных, с целью дальнейшего представления их для широкого диапазона различных состояний. Данные исследования метана позволяют выбрать для аппроксимации экспериментальные данные, включить легко интегрируемые и дифференцируемые экспоненциальные и степенные функции. Для аппроксимации экспериментальных данных, по термодинамическим свойствам, используется соотношение для молярной энергии Гельмгольца. Полученное уравнение состояния является точным для диапазона температур от 91 К до 400 К при давления ниже 55 МПа.

Проведя анализ доступных работ по термодинамическим свойствам, ключевым образом на уравнения состояния рассматриваемого рабочего тела, выбрана модель, детально описанная в работе [6]. Алгоритм использования данной модели будет раскрыт во второй главе.

1.2 Моделирование течения рабочего тела

Параметры течения зависят не только от выбранной модели, а также от уравнений, описывающих параметры течения, полей основных характеристик потока, выбираемых для описания сжимаемой, а также несжимаемой

жидкости. Параметры течения выясняются из уравнения движения, замыкает его уравнение неразрывности и энергии, а объединяет эти уравнения выбранная процедура определения термодинамических параметров согласно с уравнением состояния.

Для теоретического исследования течений в трубе, зачастую, прибегают к модели механики сплошных сред. Так, например, в работе [7] представляется теоретическая модель, описывающая течение многокомпонентной углеводородной жидкости в трубопроводе. Модель в едином подходе дает возможность для рассмотрения переходных процессов при произвольном содержании паровой фазы (от чистой жидкости до чистого пара – возникновение и схлопывание паровых полостей). На основании этого проведено численное моделирование процесса движения смеси для заданного профиля трубопровода. Показана возможность, в рамках единой расчетной схемы, проводить численное моделирование переходных процессов реализуемых при напорных и безнапорных течениях.

В работе [8] рассматривается полная система уравнений Навье-Стокса для нестационарного случая с корректно поставленными начальными и краевыми условиями, численное решение которого позволяет получить известное стационарное конвективное течение, вызванное нагревом придонной части.

В работе [9] приведен общий план иерархии задач расчета установившегося газо- и паро-жидкостных течений в трубопроводах произвольной конфигурации. Реализован алгоритм расчета участков ветви, включающий в себя настраиваемый механизм автоматического выбора методик двухфазного расчета и учет фазовых переходов.

В работе [10] проведен прямой расчет турбулентного течения в трубе имеющей эллиптическое сечение при $Re = 4000$ (число Рейнольдса - Re , вычисляется через гидравлический диаметр и среднюю скорость). Использован метод решения уравнений Навье - Стокса для несжимаемой жидкости в криволинейных ортогональных координатах, основанный на центрально-

разностной дискретизации по пространству и полунеявном методе Рунге-Кутты 3-го порядка точности для интегрирования по времени. Дискретная система уравнений принимает ряд свойств присущих исходным дифференциальным уравнениям, в частности свойство нейтральности конвективных членов и градиента давления в производстве кинетической энергии. Получено распределение средних и пульсационных характеристик турбулентного движения по сечению трубы.

Очень важно знать распределение основных параметров потока, которое будет являться следствием течения и взаимодействия с ограждающими конструкциями, и, в то же время, это поле будет определять гидравлическое и тепловое взаимодействие, то есть и стенка и поток будут взаимодействовать друг с другом. А результатами этого будет результирующее состояние потока и тепловой режим стенки.

В работе [11] разработана и протестирована континуальная эйлерова модель для описания двухфазных турбулентных течений с фазовыми переходами. Получены уравнения, учитывающие влияние турбулентности на скорость нуклеации при спонтанной конденсации и уравнения для моделирования эволюции спектра капель при коагуляции; разработан эйлеров метод фракций для трансзвуковых течений со спонтанной конденсацией и разработан соответствующий комплекс программ для расчета квазиодномерных и двумерных течений в соплах Лаваля; проведены численные расчеты, показавшие преимущества разработанной модели и численных методов для описания процессов спонтанной конденсации в сопловых аппаратах по сравнению с традиционными методами, используемыми в мировой практике; разработан программный комплекс и проведены расчеты динамики и осаждения аэрозольных частиц при турбулентном течении в трубах.

В работе [12] рассматривается моделирование и расчет теплообмена в трубных каналах при интенсифицированном турбулентном течении теплоносителя. Для решения задачи определения эффективности теплообмена и гидравлических сопротивлений в разрабатываемых трубах использовался

расчетный комплекс «FlowVision». На основании результатов моделирования процессов теплопередачи и гидравлических сопротивлений на поверхностях теплообмена в конвективных и экранных трубах выделен оптимальный диапазон изменения относительно диаметра трубы шагов турбулизирующей накатки, характеризуемый максимальной энергетической эффективностью.

В работе [13] получена теоретическая модель детерминирования теплообмена при турбулентном течении в трубах с высокими турбулизаторами большими или малыми шагами с учетом большего числа определяющих различных факторов для широкого диапазона чисел Прандтля и Рейнольдса с более высокой точностью, чем существующие теории. Установлено, что не рациональна интенсификация теплообмена посредством высоких выступов с коротким шагом, так как при этом незначительно увеличивается теплоотдача при значительном росте гидравлического сопротивления.

1.3 Численные методы моделирования параметров течения рабочего тела

В силу того, что данные уравнения представляются сложными нелинейными уравнениями, нахождение аналитического решения в общем случае, для них, крайне затруднительно, зачастую невозможно. В следствии, для моделирования такого рода сложных течений прибегают к использованию численных методов.

К примеру, в работе [14] предлагается построенный, а также прошедший проверку эффективный численный метод расчета дозвуковых течений. Метод основанный на квазигазодинамических уравнениях. Главными особенностями метода представляются способы введения искусственной диссипации, которые позволяют производить расчет тепловых потоков и коэффициента трения исключая искажения, также естественный способ задания, на свободных границах, неотражающих граничных условий, который позволяет избегать применений условия, основанного на характеристиках для уравнений Эйлера.

В работе [15] представлено описание разработки и реализации конечно-объемной численной схемы для решения уравнений динамики газа, при учете внешних сил. Для случая включения в расчётную область границы раздела «газ – вакуум», произведена адаптация алгоритма расчета. В конечном итоге построенная численная схема, позволяет сквозным образом моделировать сложные нестационарные гидродинамические течения, включающие полный набор разрывных особенностей. Основание численной модели лежит на специальном подборе алгоритма сеточной конечно-разностной аппроксимации, ограничительных функциях и Римановых решениях с фиксацией появления отрицательного значения давления с последующей коррекцией, в таковом случае, вычисленных результатов потоковых физических величин, через границы ячеек.

В работе [16] на примере двух тестовых задач, проведено сравнение численных решений, которые были получены с использованием нескольких высокоразрешающих TVD-схем, основанных на расщеплении вектора невязких потоков. В качестве первого примера, на котором уточнены разрешающие свойства численного алгоритма решения уравнений Эйлера, представляется известный тест Сода [17] примененный для задачи о распаде произвольного разрыва. Полученные в ходе различных методов численные решения сравниваются с точным решением. Вторым примером представляется реальное физическое двумерное течение около расположенной навстречу сверхзвуковому турбулентному потоку прямой ступеньки, в окрестности которой реализуется течение с отрывом. Для данной задачи результаты численных расчетов были сравнены с экспериментальными данными [18, 19]. Освоено влияние способа аппроксимации невязких потоков, а также проведено параметрическое исследование используемой двухпараметрической модели турбулентности, оказывающей сильное влияние на предсказание параметров отрывного течения.

В работе [20] проведено численное сравнение различных TVD-схем на их точность и скорость сходимости решения стационарной задачи,

отыскиваемому методом установления. В большинстве своем сходимость TVD-схем к точному решению, относительно точности передачи разрыва, весьма чувствительна по отношению к малым изменениям входных параметров. В частности – соотношение шагов сетки, взаимное расположение узлов сетки, а также параметров энтропийной коррекции.

Такие высокоточные схемы, как схема Хартена с искусственным сжатием, схема Чакравати третьего порядка, в общем то, не дают установившегося решения.

Во множестве рассмотренных схем высокую скорость сходимости к стационарному решению, достаточную точность воспроизведения разрывов дает TVD-схема Чакравати с ограничителями Ван Ли

В работе [21] проведено численное исследование процессов течения метана в жидком, двухфазном и газообразном состоянии с использованием уравнения состояния, отражающее реальные свойства рабочего тела. Математическая модель была реализована в виде программного продукта расчета, который прошел полный цикл тестовых расчетов (верификацию). были проведены численные исследования, моделирующие процессы течения по каналу постоянного сечения с исследованием влияния гидравлического и теплового взаимодействия со стенками канала. Расчеты проводились в широком диапазоне параметров по температуре от 100K до 400 K, по давлению для газообразного состояния от 0,5 до 50 МПа, для жидкого состояния от 5 до 50 Мпа и по скоростям от 0.2 м/с для жидкого состояния до 20 м/с для газообразного. Основные результаты моделирования соответствуют традиционным представлениям об изменениях параметров потока рабочего тела. Однако при численной реализации были встречены трудности – в первую очередь это связано с тем, что давление определялось с небольшой погрешностью. Неподвижное состояние при отсутствии потоков через границы («0») данный метод держит достаточно точно и устойчиво. Но при наличии скоростей (в случае ненулевых потоков на границах области) возникает нефизическая осцилляция, которая показывает о немонотонности схемы при

данных условиях. недостаточно точное определение давления, дает разброс решения.

Существуют схема С.К. Годунова численного решения задачи Римана распада газодинамического разрыва, а также более экономичные схемы для решения численных уравнений газодинамики основываясь на приближении решения задачи распада разрыва с возможностями сквозного расчёта разрывных течений, приближающимися к схеме Годунова.

Метод Годунова основан на аппроксимации потоков на границах ячеек разностной сетки по средствам точного решения задачи Римана распада газодинамического разрыва. Для точного решения задачи Римана требуется трудоемкое решение нелинейной системы уравнений методом итераций применительно так же для совершенного газа. Затруднительно само по себе получение точного решения задачи Римана.

Несколько более экономичных схем численного решения уравнений газодинамики, основанных на приближённом решении задачи распада произвольного разрыва с возможностями сквозного расчёта разрывных течений, приближающихся к схеме Годунова:

Схема С.К. Годунова. [24] представляется аппроксимацией параметров на границах ячеек разностной сетки, что осуществимо с помощью точного решения задачи Римана-распада произвольного разрыва с параметрами, равными параметрам газа в соседних ячейках сетки. Решение данной задачи первоначально требует решения нелинейной системы уравнений, методом итераций. В работе [24] предлагается итерационный алгоритм решения этой задачи методом Ньютона, в качестве начального приближения используется акустическое (линеаризованное) приближение. Обзор различных способов получения точного решения задачи Римана можно найти в работе [25]

В работе [26] рассмотрена схема PVRs-TSRs-TSRs. (Primitive Variable Riemann Solvers — Two-Rarefaction Riemann Solvers — Two-Shock Riemann Solvers) . Схема основывается на сложении трех приближенных решений для задачи Римана - линеаризованном решении (акустического приближения), где

полученное давление уточняется в приближении с двумя волнами разряжения, или же с двумя скачками.

Данная схема является первой итерацией схемы Годунова, затрудняя получение решения задачи в сложных случаях, в виду наличия осцилляций на разрывах.

В работе Холодова, Рое [27] Сеточно-характеристические схемы (СХМ) типа схем KUR (Курант и др.), применительны для аппроксимации параметров на границах ячеек разностной сетки применяют соотношения на характеристиках. Аппроксимация в рамках данной схемы интерпретируется в виде линеаризованного решения задачи распада произвольного разрыва в расположении с двумя скачками. Схема Роу особенна тем, что при определенных осредненных параметрах, поток между ячейками (на границе) соответствует приближённому решению задачи о распаде разрыва с выполненными соотношениями на разрывах. СХМ хорошо зарекомендовали себя для расчётов течений с наличием ударных волн и контактных разрывов, однако имеют проблемы с энтропией (появление нефизических скачков) для рассчитываемых зон разрежения, при смене знака характеристик. В целях устранения данных эффектов СХМ применяется «энтропийная» коррекция.

Двухволновая схема HLL (Harten, Lax, Leer) и её модификации с добавлением третьей волны HLLC [26]. Схема HLL основана на двухволновом приближении, без рассмотрения контактного разрыва.

Предложенный в схеме простой, и в то же время эффективный способ выбора скоростей волн по максимальному наклону характеристик в соседних ячейках разностной сетки. Данный способ исключает проблемы с энтропией, при смене знака характеристик, описанные выше.

В прочем, отсутствие учета условий на контактном разрыве, приводит к «размазыванию» контактного разрыва. Для устранения данного недостатка в схеме HLLC [26] предлагается несколько способов учета контактного разрыва.

Схема численного решения уравнений газодинамики предложенная С.К. Годуновым, без сомнения, является наилучшей, с точки зрения точности и

надежности при сквозном расчёте сложных разрывных течений газа, с учетом включающих скачков уплотнений различной интенсивности, зон разрежений и контактных разрывов.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ТЕПЛООБМЕННИКАХ – ИСПАРИТЕЛЯХ ИЛИ КОНДЕНСАДОРАХ

2.1 Физическая постановка задачи

В качестве среды для моделирования выбран объект в виде термодинамического метана, который имеет право находиться в однофазном или двухфазном состоянии.

Областью решения представляется область в виде длинной трубы (рисунок 2.1), которая дает объективную возможность подойти к задаче о моделировании течения как одномерной по пространственной координате. В трубу осуществлена подача в некой массы газа, которая обладает энергетическими параметрами соответственно. Труба заканчивается выходами в большие объемы. Опираясь на рассмотрение практических задач, течение принято **существенно дозвуковое**.

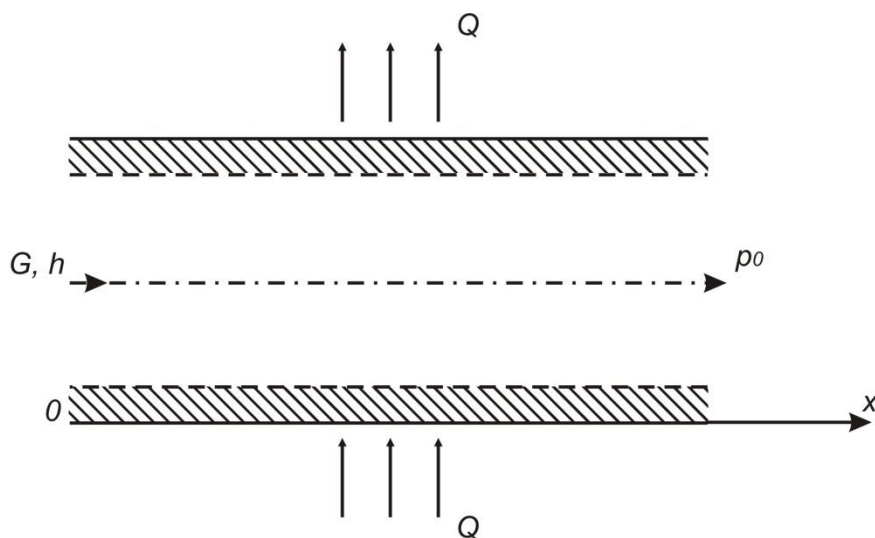


Рисунок 2.1 Область решения рассматриваемой задачи.

Согласно допущениям к описанию процесса движения и нахождения данных параметров, были привлечены одномерные нестационарные дифференциальные уравнения (система уравнений), которые используются для моделирования течения рабочего тела с учетом конструкции канала [21, 22, 23]. Основные уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho w}{\partial x} = -G_{condensate}, \quad (2.1.2)$$

где ρ – плотность, кг/м³;

w – скорость, м/с;

$G_{condensate}$ – приведенная массовая скорость конденсации на стенках канала (на поверхности единичного объема), кг/(м³·с);

уравнение движения:

$$\frac{\partial \rho w}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho w^2 + p)}{\partial x} = -F_{friction} - G_{condensate} \cdot w, \quad (2.1.2)$$

где p – давление, Па;

$F_{friction}$ – приведенная сила трения, Н/м³;

уравнение энергии:

$$\frac{\partial \rho(\epsilon + \frac{w^2}{2})}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho w(h + \frac{w^2}{2})}{\partial x} = -Q_{out} - G_{condensate} \cdot h_{condensate}. \quad (2.1.3)$$

где ϵ – удельная внутренняя энергия Дж;

h – удельная энтальпия, Дж/кг;

Q_{out} – тепловой поток в стенку канала, Дж;

$h_{condensate}$ – удельная энтальпия сконденсировавшегося вещества, Дж/кг.

В данных уравнениях для определенности выбран процесс конденсации, хотя для описания процесса регазации изменится только знак соответствующих значений потоков.

При рассмотрении течения, в качестве начальных условий задается равномерное начальное распределение температуры, давления, плотности и энтальпии.

Считается, что канал с обеих сторон ограничен объемами, в которых задается полный набор соответствующих термодинамических параметров. Рассматриваются существенно дозвуковые скорости течения потока. Поэтому при втекании давление на границе полагается равным давлению в области

канала, прилегающей к границе, а при истечении – давлению в объеме, куда движется поток. В качестве граничных условий выбирается:

- при втекании в канал равенство удельных энтальпий на границе и в прилегающем объеме, а так же равенство удельного импульса втекающего в канал газа давлению в объеме, откуда происходит истечение.

- при истечении из канала ставится одно граничное условие – равенство давления на границе давлению в объеме, куда истекает газ.

Так для объема слева реализация данных граничных условий принимает следующий вид:

Поступление рабочего тела в канал слева $W > 0$, $P_i < P_0$ (втекание), в соответствии с этим границе задаются энтальпия, и импульс:

$$h_0 = \text{const} \quad (2.1.4)$$

$$P_0 = P_i + RW^2 \quad (2.1.5)$$

Плотность и энтальпия на границе вычисляются соответственно из решения на соответствующей волне

$$R = \frac{\rho_i c_i}{c_i + (w_i - W)} \quad (2.1.6)$$

$$H = h_{\text{left}} + \frac{W^2}{2} \quad (2.1.7)$$

подставляя (2.1.6) в (2.1.5) получаем выражение:

$$P_0 = P_i + \frac{\rho_i c_i}{(u_i + c_i - W)} \cdot W^2 \quad (2.1.8)$$

Откуда скорость на границе

$$W = \frac{P_0 - P_i}{2\rho_i c_i} \left[\sqrt{1 + \frac{4\rho_i c_i (u_i + c_i)}{P_0 - P_i}} - 1 \right] \quad (2.1.9)$$

В случае, когда $W < 0$ (истечение) на границу сносится давление $P_i = P_0$

2.2 Моделирование термодинамических параметров потока

Традиционно данная система уравнений (2.1.2, 2.1.2, 2.1.3) замыкается уравнением состояния. Свойства рабочего тела описываются с использованием уравнения состояния в широком диапазоне параметров, предложенное в статье [6]. Суть данного подхода обстоит в следующем: имеющиеся в распоряжении авторов экспериментальные данные по метану [6], использованы для аппроксимации свободной энергии Гельмгольца, а в качестве аппроксимирующих функций удачно выбраны легко интегрируемые и легко дифференцируемые экспоненциальные и степенные функции. Что позволяет достаточно успешно преобразовывать аппроксимационную зависимость для определения всех остальных основных термодинамических параметров метана.

Молярная энергия Гельмгольца представлена в виде суммы двух слагаемых, первое из которых (A^{id}) соответствует характеристикам метана как для идеального газа, а второе (A^r) слагаемое вносит поправку, учитывая реальные свойства рабочего тела:

$$A(p, T) = A^{id} + A^r = RT\phi = RT(\phi^{id} + \phi^r), \quad (2.2.7)$$

где A – молярная энергия Гельмгольца, Дж/моль;

T – температура, К;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К);

id – идеальный газ;

r – реальный газ;

ϕ – приведенная энергия Гельмгольца.

Аппроксимационные зависимости используют безразмерные значения плотности (ρ) и «обратной» температуры (T), отнесенные, соответственно, к критическим параметрам (ρ_c, T_c):

$$\delta = \rho/\rho_c, \quad (2.2.8)$$

$$\tau = T_c/T, \quad (2.2.9)$$

В данном случае аппроксимационные зависимости описываются следующим образом:

$$\varphi^r = \sum_{i=1}^{13} n_i \delta^{r_i} \tau^{s_i} + e^{-\delta^2} \sum_{i=14}^{24} n_i \delta^{r_i} \tau^{s_i} + e^{-\delta^{24}} \sum_{i=25}^{32} n_i \delta^{r_i} \tau^{s_i}, \quad (2.2.10)$$

$$\varphi^{id}(\delta\tau) = A^{id} / RT = Q_1 + \ln \delta + Q_2 \ln \tau + Q_3 \tau^{-1/3} + Q_4 \tau^{-2/3} + Q_5 \tau^{-1} + Q_6 \ln(1 - e^{Q_7 \tau}), \quad (2.2.11)$$

где δ - плотность приведенная;

τ – температура приведенная ;

T – температура рабочего вещества, К;

T_c – критическая температура, К;

ρ_c – плотность критическая, кг/м³;

r_i – экспонента от δ ;

s_i – экспонента от τ ;

Q_i – экспериментальные коэффициенты для идеального газа.

В данном подходе плотность получается из уравнения неразрывности (2.1.1), внутренняя энергия из уравнения энергии (2.1.3), которые в следующем используются в качестве входных параметров для уравнения состояния и определения всех остальных термодинамических параметров исходя из следующих соотношений [6]:

а) давления:

$$p(\rho, T) = \rho RT(1 + \delta\varphi_\delta^r), \quad (2.2.12)$$

б) энтальпии:

$$h(\rho, T) = RT(1 + \tau\varphi_\tau^{id} + \tau\varphi_\tau^r + \delta\varphi_\delta^r), \quad (2.2.13)$$

в) энергии Гиббса:

$$G(\rho, T) = RT(1 + \varphi^{id} + \varphi^r + \delta\varphi_\delta^r), \quad (2.2.14)$$

г) энергии Гельмгольца:

$$A(\rho, T) = RT(\varphi^{id} + \varphi^r), \quad (2.2.15)$$

д) энтропии:

$$S(\rho, T) = -R(\varphi^{id} + \varphi^r - \tau\varphi_\tau^{id} - \tau\varphi_\tau^r), \quad (2.2.16)$$

е) изохорной теплоемкости:

$$c_v(\rho, T) = -R(\tau^2\varphi_{\tau\tau}^{id} + \tau^2\varphi_{\tau\tau}^r), \quad (2.2.17)$$

ж) изобарной теплоемкости:

$$c_p(\rho, T) = c_v(\rho, T) + R \frac{(1 + \delta\phi_\delta^r - \delta\tau\phi_{\delta\tau}^r)^2}{1 + 2\delta\phi_\delta^r + \delta^2\phi_{\delta\delta}^r}, \quad (2.2.18)$$

Система уравнений (2.1.1, 2.1.2, 2.1.3), дополненная начальными и граничными условиями, позволяет определить нестационарные поля, в том числе плотность и внутреннюю энергию, которые используются в уравнении состояния (2.2.7) с учетом (2.2.8)- (2.2.18). Что представляет замкнутую математическую модель течения рабочего тела, описывающая процессы тепломассообмена в широком диапазоне обычных и крио- температур.

2.3 Моделирование взаимодействия потока со стенками канала

В качестве основного допущения при выборе соотношений по определению влияния трения и тепловых потоков, было принято представление рабочего тела как однофазной жидкости. При необходимости изменение соответствующих критериальных зависимостей на соотношения с учетом двухфазности является чисто технической задачей.

2.3.1 Моделирование гидравлического взаимодействия

При движении жидкости по трубопроводу имеют место возникновения потери механической энергии, зависящие от длины трубопровода (пропорциональны длине канала) а также потери энергии на местные сопротивления – зависящие от изменений скоростей потока по направлению, либо по величине. Обусловленные, в конечном итоге вязкостью жидкости, возникающие потери потоковой энергии на преодоление сопротивления на длину, а так же на преодоление на местные сопротивления, приводят к рассеиванию и переходу теряемой механической энергии в теплоту.

Значимость определения потерь давления (или потерь напора) зависима от необходимости расчета затрат энергии, требуемой для компенсации данных потерь при перемещении жидкостей, и учета влияния притока теплоты за счет трения на термодинамическое состояние рабочего тела [28].

Потерянный напор представляется как сумма двух слагаемых:

$$h_w = h_{тр} + h_{мс}, \quad (2.3.1.1)$$

где $h_{тр}, h_{мс}$ – потери напора на трения, на местные сопротивления, соответственно.

Вычисление потерь напора при турбулентном режиме обычно производится по средствам частных эмпирических формул:

$$h_{тр} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (2.3.1.2)$$

$$h_{мс} = \xi \frac{v^2}{2g}, \quad (2.3.1.3)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения;

ξ – коэффициент местного сопротивления;

l – длина трубопровода, м;

d – диаметр трубы, м;

v – средняя скорость движения жидкости в трубопроводе, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Средняя скорость, состоящая в формулах (2.3.1.2) – (2.3.1.3) – такая скорость, которая одинакова во всех точках сечения, за единицу времени, при которой, через данное сечение проходит такой расход жидкости, что и при длительном распределении скоростей потока. Средняя скорость определяется исходя из уравнения расхода:

$$v = \frac{Q}{S}, \quad (2.3.1.4)$$

где Q – расход (объемный), т.е. такой объем жидкости, который проходит через живое сечение потока, за единицу времени м³/с;

S – живое сечение потока (в случае с трубой, равный площади поперечного сечения трубы), м².

Из формул (2.3.1.2) и (2.3.1.3) следует, что потери энергии на трение и местные сопротивления пропорциональны скоростному и динамическому напору $\left(\frac{v^2}{2g} \right)$, который представляется как кинетическая энергия потока,

отнесенная к единице объема жидкости. Зависимость принимает более сложный вид, в действительности, так как коэффициент местного сопротивления ξ и коэффициент трения λ не являются постоянными величинами, а имеют значительную зависимость от скорости течения самой жидкости, ее вязкости и плотности, а так же шероховатости и диаметра труб.

Величина коэффициента трения выглядит по-разному, в зависимости от различных режимов движения потока в трубе. В одном и диапазонах чисел Рейнольдса, характеризующего режим движения, на величину λ в большей степени оказывает влияние скорость, одновременно в другом диапазоне преобладает влияние геометрических характеристик – диаметра и шероховатости трубы (высота выступов шероховатости Δ). В связи с этим вводят градацию на четыре области сопротивления, где изменение λ имеет разную закономерность.

Первой областью считается область ламинарного потока, в рамках значений $Re < 2300$, в которой λ зависящая от Re и не зависящая от величины Δ , определена согласно формуле Пуазейля:

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (2.3.1.5)$$

При таких значениях коэффициентов гидравлического трения λ сумма потерь напоров на длину трубопровода значатся пропорциональными скорости в первой степени. Ряд остальных областей сопротивления относятся к зоне турбулентного режима, где имеют место различные степени турбулентности.

Второй областью представляется область гидравлически гладких труб. Поток в трубах в данной области турбулентный, однако у стенок труб имеется некоторый слой жидкости, в границах данного слоя остается ламинарное движение. Если толщина ламинарного слоя δ больше высоты выступов шероховатости трубы считаются гидравлически гладкими. В таком случае ламинарный слой накрывает имеющиеся неровности стенок трубопровода и последние исключают тормозящее влияние на основной турбулентный поток.

Граница зоны гидравлически гладкой трубы определяется в соответствии с зависимостью:

$$Re = 27 \left(\frac{d}{\Delta} \right)^{1,14}. \quad (2.3.1.6)$$

Для гладкой трубы, когда $\delta > \Delta$ коэффициент λ определяется согласно формуле Блазиуса:

$$\lambda = 0,316 \cdot Re^{-0,25} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}, \quad (2.3.1.7)$$

последняя применима для значений чисел Рейнольдса $Re \leq 10^5$.

Третья область представляет собой переходную из области гидравлически гладкой трубы к квадратичной области. В третьей области толщина ламинарного слоя δ меньше или равна выступам шероховатости Δ , которые в данном случае играют роль препятствия у стенки трубы, увеличивая тем самым турбулентность, и как следствие сопротивление в потоке. Определение λ в переходной области согласно формуле:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[\frac{\Delta}{3,7} + \left(\frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} \right]. \quad (2.3.1.8)$$

Потеря напора на длину трубы в переходной области сопротивления пропорциональна скорости в степени 1,75 - 2,0.

Четвертая область применима к гидравлически шероховатым трубам или к квадратичному сопротивлению (автомодельная область). Главной причиной сопротивления потоку представляется шероховатость стенок трубы. Чем значительнее выступы шероховатости Δ , тем больше вызываемая турбулентность, отсюда следует рост затрат энергии в потоке на преодоление сопротивления. В квадратичной области сопротивления коэффициент λ не имеет зависимости от скорости, а является исключительно функцией относительной шероховатости ε , которая выражается как отношение абсолютной шероховатости Δ к диаметру трубы:

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d}. \quad (2.3.1.9)$$

Для автомодельной области в уравнении (2.3.1.8) пренебрегают вторым слагаемым в квадратных скобках, и слагаемое примет вид:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \frac{\Delta}{3,7}. \quad (2.3.1.10)$$

2.3.2 Моделирование теплового взаимодействия

Для рассмотрения турбулентного пограничного слоя использовалась формула [29]:

$$q_c = \frac{s_c c_p (t_0 - t_c)}{\omega_0 \left[1 + \frac{12}{\omega_0} \sqrt{\frac{s_c}{\rho}} (\text{Pr}^{2/3} - 1) \right]}, \quad (2.3.2.1)$$

При течении в трубе принимаем, что $t_0 = \bar{t}$ и $\omega_0 = \varpi$, где $\bar{t}$ и ϖ - соответственно, средние по сечению температура и скорость жидкости.

Безотрывное течение, при котором гидравлическое сопротивление подчиняется силам трения, значения s_c легко находимы, если известны значения коэффициента λ при стабилизированном течении.

Разности давления в двух поперечных сечениях трубы у стабилизированного течения учитывается для определения трения на стенках (для начального участка дополнительно для перестройки потока). Тогда:

$$\Delta p f = s_c F, \quad (2.3.2.2)$$

где f – площадь поперечного сечения трубы;

F – поверхность трубы между сечениями.

По закону Дарси:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho \varpi^2}{2}, \quad (2.3.2.3)$$

тогда:

$$s_c = \Delta p \frac{f}{F} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho \varpi^2}{2} \frac{f}{F}, \quad (2.3.2.4)$$

Для круглых труб:

$$\frac{l}{d} \frac{f}{F} = \frac{1}{4}, \quad (2.3.2.5)$$

Отсюда

$$s_c = \frac{\lambda}{8} \rho \varpi^2, \quad (2.3.2.6)$$

Последнее соотношение подставляется в уравнение (2.3.2.1) и разделяя левые и правые части на $\rho c_p \varpi (\bar{t} - t_c)$, получаем:

$$St = \frac{\alpha}{\rho c_p \varpi} = \frac{\lambda / 8}{1 + 12 \sqrt{\lambda / 8} (\text{Pr}^{2/3} - 1)}, \quad (2.3.2.7)$$

Число Стантон St изображается в следующем виде:

$$St = Nu / (\text{Re Pr}), \quad (2.3.2.8)$$

Если $\text{Pr} = 1$, то вместо (2.3.2.7) получается:

$$St = \frac{\xi}{8} \text{ или } Nu = \frac{\xi}{8} \text{Re Pr}, \quad (2.3.2.9)$$

Б. С. Петуховым и В.В. Кирилловым [30] предлагается формула

$$Nu_{\text{жд}} = \frac{\frac{\xi}{8} \text{Re}_{\text{жд}} \text{Pr}_{\text{ж}}}{1,07 + 12,7 \sqrt{\xi / 8} (\text{Pr}^{2/3} - 1)} \varepsilon_t, \quad (2.3.2.10)$$

в которой несколько уточняются постоянные имеющиеся в уравнении. Здесь $\varepsilon_t = (\mu_{\text{ж}} / \mu_{\text{с}})^n$; $n = 0,25$ при охлаждении капельной жидкости, $n = 0,11$ при ее нагревании.

Формула (2.3.2.10) выражает значения коэффициентов теплоотдачи стабилизированного теплообмена. За определяющую принимаются либо средняя температура в трубе (при расчете средних коэффициентов теплоотдачи) либо средняя по сечению температура жидкости (при расчете местных коэффициентов теплоотдачи). Исключением является коэффициент динамической вязкости $\mu_{\text{с}}$, который выбирается в зависимости от температуры стенки. В качестве определяющих размеров принимают внутренние диаметры труб. Для расчета теплоотдачи жидкостей различного вида, пригодна формула (2.3.2.10), при критерии $\text{Pr} \geq 0,7$.

Основываясь на уравнении (2.3.2.9) выражается расчетная формула для $Pr \geq 1$, путем ввода в (2.3.2.9) экспериментально определенной функции $f(Pr) = 0,91Pr^{0,43}$. Определение коэффициента гидравлического сопротивления согласно формуле:

$$\xi = 0,184 Re_d^{-0,2}, \quad (2.3.2.11)$$

Тогда, вводя дополнительную поправку $\varepsilon_t = (Pr_{ж} / Pr_c)^{0,25}$ на переменность физических свойств капельных жидкостей, получается формула, предложенная М.А. Михеевым [31]:

$$\overline{Nu}_{jd} = 0,0021 Re_{jd}^{0,8} Pr_{ж}^{0,48} (Pr_{ж} / Pr_c)^{0,25}, \quad (2.3.2.12)$$

Данная формула представляет описание средней теплоотдачи в прямых гладких трубопроводах при $(l/d) > 50$. За определяющую здесь принимают среднюю температуру жидкости в трубе, а в качестве определяющего размера – внутренний диаметр трубы. Число Pr_c выбирается по среднему значению температуры поверхности стенки.

А.С. Сукомел и др. была получена формула для расчета местных коэффициентов теплоотдачи при турбулентном течении газа для прямой гладкой трубы [32]:

$$Nu_{ж(x)d} = 0,022 Re_{ж(x)}^{0,8} Pr_{ж(x)}^{0,48} \varepsilon_l. \quad (2.3.2.13)$$

Определяющей принимается средняя в данном сечении температура газа, а внутренний диаметр трубы за определяющий размер. Величина ε_l - поправка на изменение коэффициента теплоотдачи в начальном термическом участке. При $(x/d) \geq 15$ имеем $\varepsilon_l \approx 1$. При $(x/d) < 15$, с самого начала трубы турбулентном течении, согласно [32] поправочный коэффициент ε_l определяется по формуле:

$$\varepsilon_l = 1,38(x/d)^{-0,12}, \quad (2.3.2.14)$$

Исходя из последнего уравнения, коэффициент теплоотдачи, на начальном участке, уменьшается, по мере увеличения x .

Производя расчет средней теплоотдачи коротких труб ($l/d \lesssim 50$), по формулам (2.3.2.10) и (2.3.2.10), полученные значения $\overline{Nu}$ необходимо умножить на поправку $\overline{\varepsilon}_l = \overline{\alpha} / \alpha_\infty$, где α_∞ - коэффициент теплоотдачи при $(l/d) \rightarrow \infty$ [практически $(l/d) > 50$].

Длины начальных теплового и гидродинамического участков зависят от ряда факторов, к примеру, от числа Рейнольдса, начального распределения скорости, степени турбулентности потока на входе, тепловых граничных условий и т.п. От этих же факторов имеют зависимость поправочные коэффициенты ε_l и $\overline{\varepsilon}_l$. Как следствие используемые в настоящее время в практике значения поправочных коэффициентов не являются универсальными и отражают специфику опытных исследований, в результате которых они были получены. Чем меньше l/d (или x/d), тем больше может быть ошибка расчета [33].

Используя уравнение (2.3.2.14), для оценки $\overline{\varepsilon}_l$ можно получить следующую выражение:

$$\overline{\varepsilon}_l \approx 1 + \frac{2}{l/d}, \quad (2.3.2.15)$$

где l – отсчитываемая от входного сечения трубы длина участка осреднения.

Коэффициент теплоотдачи также зависит от того, как меняется температура стенки, по всей длине трубы. В то же время, при турбулентном течении неизотермичность поверхности стенок сравнительно слабо сказывается на теплоотдаче.

Коэффициент теплоотдачи может отличаться от вычисленного, в случае теплообмена газа при больших температурных напорах по следующим уравнениям: (2.3.2.10)- (2.3.2.13) [для газов поправки такого рода как $(Pr_{ж}/Pr_c)^n$ и $(\mu_{ж}/\mu_c)^n$ не учитываются]. Изменение теплоотдачи обычно учитывается путем введения в правую часть уравнений (2.3.2.6)- (2.3.2.9) функции $f(\Theta_c)$, где $\Theta_c = T_c / T_{ж}$; T_c – местная или средняя температура, К, стенки в зависимости от того рассчитывается местный или средний

коэффициент теплоотдачи; $T_{\text{ж}}$ - соответственно среднемассовая в трубе или в конкретном сечении температура газа, К.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5ФМ41	Скрябинскому Дмитрию Олеговичу

Институт	Энергетический	Кафедра	ТПТ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Физика и техника низких температур

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Затраты на специальное оборудование определяются согласно стоимости оборудования по прейскурантам или по договорной цене. Заработная плата рассчитывается исходя из тарифной ставки и коэффициентов, зависящих от различных условий: организация, регион. Страховые отчисления определяются согласно Федеральному закону от 24.07.2009 №212-ФЗ. Прочие и накладные расходы определяются исходя из суммы остальных статей расходов.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Оценка потенциала и перспективности реализации НТИ можно оценить с помощью SWOT-анализа и интегральной оценки ресурсоэффективности.
2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет.	Для составления графика технико-конструкторских работ используется оценка трудоемкости работ для каждого исполнителя.
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	В процессе формирования сметы НТИ используется следующая группировка затрат по статьям: - материальные затраты ТП; - полная заработная плата исполнителей; - отчисления во внебюджетные фонды; - накладные расходы.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Таблицы оценки вариантов проведения исследования
3. График проведения и бюджет НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко А.А.	К.Э.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ41	Скрябинский Дмитрий Олегович		

ГЛАВА 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.

Рамки данной работы НИР включают в себя создание математической модели для моделирования состояния конвективных течений в хранилищах сжиженного природного газа путем создания программного комплекса. При создании комплекса использовались среда программирования и отладки матричная лаборатория MatLab. На основе НИР оформлена диссертационная работа в пакете программ Microsoft Office.

5.1. Предпроектный анализ.

5.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования.

Изучение теплопереноса в хранилищах сжиженного природного газа (СПГ) имеет большое значение при моделировании и оптимизации физических процессов, связанных с хранением и транспортировкой СПГ. Увеличение количества хранилищ и объемов производства СПГ и неотложность проблем охраны окружающей среды приводят к тому, что возникает необходимость знать о том, что может привести к аварии на больших хранилищах СПГ и вовремя предотвратить это. Таким образом, изучение процессов теплопереноса в различных хранилищах СПГ сложно переоценить.

Конвективный теплоперенос играет важную роль в природе и во многих отраслях техники, представляющих значительный интерес. В частности, от масштабов естественной конвекции зависит безопасность эксплуатации хранилищ СПГ.

В данной работе впервые получено решение задачи конвективного теплопереноса в хранилище СПГ.

Создан вычислительный комплекс для моделирования конвективного теплопереноса в хранилище СПГ.

Полученные новые численные результаты могут быть использованы для совершенствования существующих методик расчета теплового состояния хранилищ СПГ, а также позволят прогнозировать оптимальный режим их эксплуатации. Разработанная математическая модель может быть применена для определения параметров теплового режима хранилища СПГ. При этом могут быть учтены факторы старения материалов теплоизоляционных конструкций.

Так же теоретически определены рынки сбыта разработанного программного обеспечения, это крупнотоннажные заводы СПГ, такие как: Балтийский СПГ, Владивосток-СПГ и Сахалин-2.

5.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Таблица 1. Оценочная карта для сравнения конкурентного программного обеспечения (технических разработок)

Наименование ПО	Преимущества	Недостатки
MatLab	1. Удобный графический интерфейс; 2. Проверка результатов в режиме реального времени; 3. Содержит обширную библиотеку компонентов блок-схемы, а также удобный редактор компонентов; 4. Возможность исследовать работоспособность систем, выявлять ошибки, исправлять недостатки.	1. Дороговизна лицензий; 2. Неполная поддержка статических функций.
Pascal	1. Качественная среда разработки, включающая мощный отладчик; 2. Высокая скорость компиляции; 3. Высокая скорость выполнения откомпилированных программ.	1. Недостаточно полно реализовано объектно-ориентированное программирование; 2. Компилятор рассчитан на реальный режим DOS, который сейчас практически не используется
C++	1. Пользовательские функции-операторы позволяют кратко и ёмко записывать выражения над пользовательскими типами в естественной алгебраической форме; 2. Поддерживаются различные стили и технологии программирования; 3. Эффективность. Язык спроектирован так, чтобы дать программисту максимальный контроль над всеми аспектами структуры и порядка исполнения программы.	1. Сложность и избыточность, из-за которых C++ трудно изучать. 2. В языке практически полностью сохранён набор конструкций Си. 3. Шаблоны в своём исходном виде приводят к порождению кода очень большого объём. 4. Метапрограммирование на основе шаблонов C++ сложно и при этом ограничено в возможностях.

Python	1. встроенные структуры данных, словари, кортежи; 2. простой и удобный синтаксис; 3. мощные интерфейсы к конкретным ОС.	1. медленное выполнение; 2. плохо читается код; 3. отсутствуют встроенные современные типы данных.
--------	---	--

В результате научно-исследовательской работы необходимо проанализировать влияние конвективного теплообмена в прямоугольной области, что наглядно видно на графических изображениях. Поэтому для исследования выбрано программное обеспечение Pascal, так как он обладает высокой скоростью компиляции, что существенно экономит время в расчетах подобного рода.

5.3. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Таблица 2. Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Низкая стоимость программного обеспечения С2. Низкая стоимость исследования в целом (в сравнении с другими видами исследования) С3. Ненадобность в дорогостоящем лицензировании продукта С4. Доступная замена зарубежным аналогам	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: СЛ1. Продолжительное время отладки кода программного обеспечения СЛ2. Узкий выбор исследуемых веществ (природный газ)
--	---	--

	С5.Легкий и быстрый доступ к расчетам на любых компьютерных системах	
Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2.быстрое развитие углеводородной отрасли В3. Появление дополнительного спроса на данный продукт В4. Импортзамещение на российском рынке.		
Угрозы: У1.Сложности экспорта технологий У2.сложности с сертификацией технологий У3.Повышение цен на стоимость программного обеспечения У4.Рост конкуренции на рынке подлюбных продуктов		

Таблица 3. Интерактивная матрица проекта

Возможности проекта	Сильные стороны проекта					
		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	0	0	0	0	0
	B2	0	0	0	1	0
	B3	1	2	1	1	2
	B4	1	1	0	2	0
Возможности проекта	Слабые стороны проекта					
		СЛ1	СЛ2	СЛ3	СЛ4	СЛ5
	B1	0	0			
	B2	0	0			
	B3	0	2			
	B4	0	0			
Угрозы	Сильные стороны проекта					
		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	1	0	0	0	0
	У2	0	1	1	1	0
	У3	1	2	0	1	0
	У4	1	1	0	1	0

Где «2» - означает сильное соответствие сторон, «1» - слабое соответствие, «0» - отсутствие соответствия вообще.

Исходя из результатов интерактивных таблиц, на наличие соответствий сторон с возможностями и угрозами, можно сделать вывод о том, что научно-исследовательский проект имеет ряд преимуществ, а именно низкая стоимость проекта, его доступность, дают ряд возможностей для его развития.

5.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации

Для того чтобы оценить готовность проекта к коммерциализации составим бланк оценки степени готовности проекта.

Таблица 4 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации.

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
----------	--------------	--	---

1.	Определен имеющийся научно-технический задел	3	3
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	3	2
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	3	2
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	2	1
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	2	3
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	2
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	2
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	3	2
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	1
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	2
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	1
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	3	1
	ИТОГО БАЛЛОВ	34	25

При проведении анализа по таблице, приведенной выше, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. Так, при оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла –

выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

После проведения анализа видно, что степень проработанности научного проекта на среднем уровне, а уровень имеющихся знаний у разработчика ниже среднего.

5.5. Планирование управления научным проектом.

5.5.1 Контрольные события проекта.

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

Первоначально составляется полный перечень проводимых работ, и 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 составим перечень работ и соответствие работ своим исполнителям в таблице 1. Основные исполнители в проекте: инженер (И) и научный руководитель (НР).

Таблица 5 – 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	30%
	И	70%
Реализация алгоритма в среде программирования	НР	5%
	И	95%
Отладка полученного программного комплекса	И	100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	100%
Подведение итогов – сравнение полученных результатов с желаемыми	НР	40%
	И	60%

5.5.2. План проекта.

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 (1 – 4)[1].

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}, \quad (1)$$

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

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

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях, $T_{\text{рд}}$ ведется по формуле

$$T_{\text{рд}} = \frac{t_{\text{ож}}}{K_{\text{вн}}} \cdot K_{\text{д}}, \quad (2)$$

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

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

$K_{\text{д}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсации и согласование работ ($K_{\text{д}} = 1,2$).

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

$$T_{\text{кд}} = T_{\text{рд}} \cdot T_{\text{к}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{к}}$ – коэффициент календарности.

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

$$T_{\text{к}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вд}} - T_{\text{пд}}}, \quad (4)$$

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

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

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

$$T_{\text{к}} = \frac{365}{365 - 52 - 12} = 1,213$$

В таблице 2 приведены длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе. На основании таблицы 1 составим линейный график работ и представим его на рисунке 1.

Таблица 6 – 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 общего алгоритма программного комплекса	НР, И	8	15	10,8	3,89	9,07	4,72	11,00
Реализация алгоритма в среде программирования	НР, И	18	25	20,8	1,25	23,71	1,51	28,76
Отладка полученного программного комплекса	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

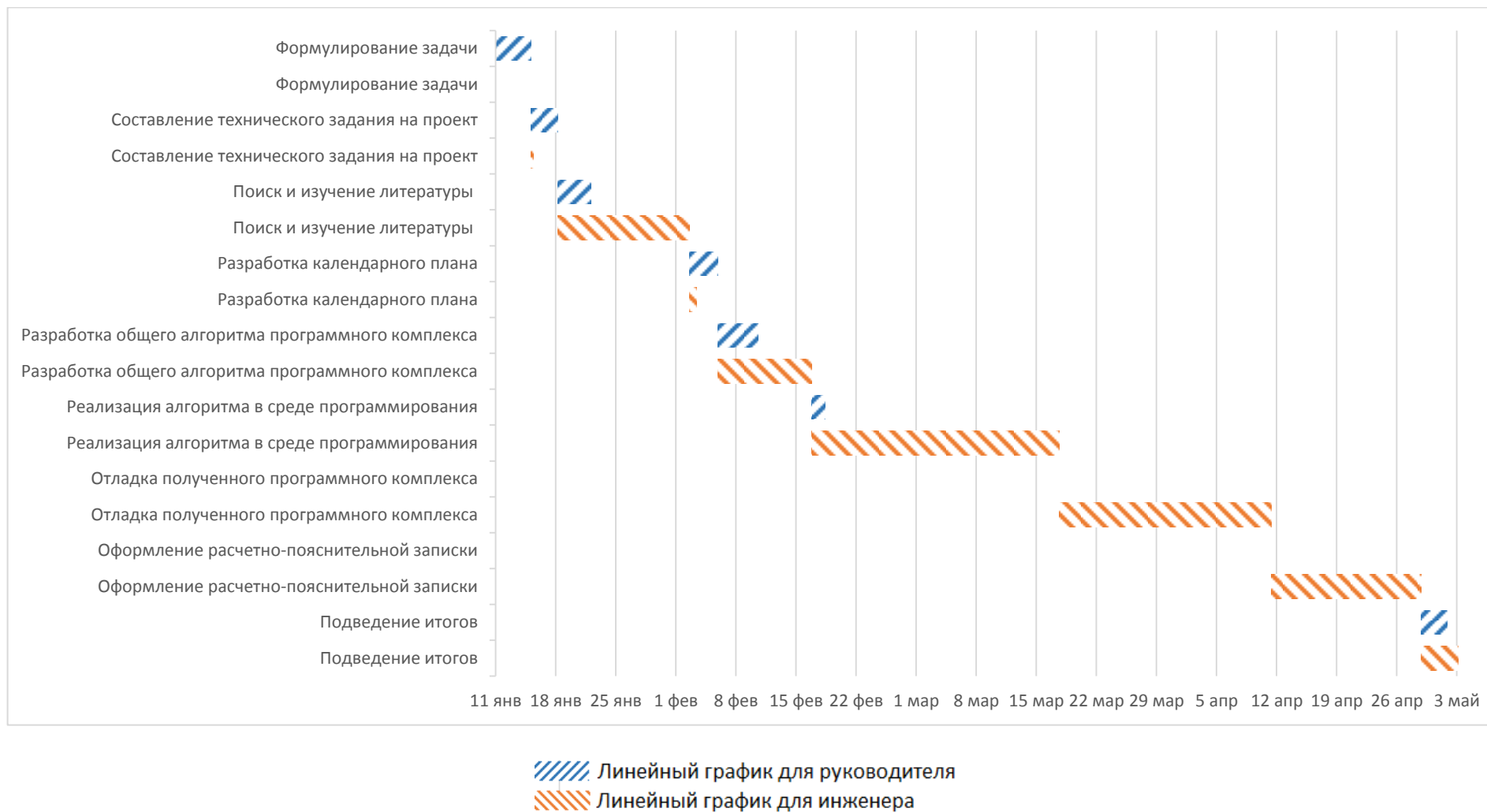


Рисунок 1 - Линейный график работ на основе рассчитанного для инженера и научного руководителя времени ТКД

5.6. Бюджет научного исследования

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 2015 год по соответствующим ценникам и приведена в таблице 3.

Таблица 7 – Расходные материалы [2],[3]

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Офисная техника			
Компьютер	25000	1	25000
Клавиатура	500	1	500
Мышка	500	1	500
Принтер	4000	1	4000
Офисная мебель			
Стол	2000	1	2000
Стул	700	1	700
Программное обеспечение			
Pascal	2 337.66	1	2 337.66
Microsoft Office 2010	21000	1	21000
Итого:	56037,66		

Расходы на материалы составили $C_{\text{мат}} = 56037,66$ руб.

Следующей статьей 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:

$$\text{Дневная з. пл} = \frac{\text{Месячный оклад}}{25,17 \text{ дней}}, \quad [5]$$

Расчет затрат на основную заработную плату приведен в таблице 4.

Таблица 8 – Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес	Среднедневная ставка, руб./день	Затраты времени, дни	К	Фонд з/платы, руб.
НР	24600	980,86	24	1,4	32 957
И	15000	598,09	104	1,4	87 081
Итого:			120 038,3		

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили $ЗП_{\text{осн}} = 120038$ 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 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 выполнение темы [1], используемые формулы (6 – 15) взяты [1]

$$ЗП_{\text{доп}} = 0,1 \cdot ЗП_{\text{осн}}, \quad (6)$$

$$ЗП_{\text{доп}} = 0,1 \cdot 120038 = 12000,38 \text{ руб.}$$

В результате научно-исследовательской работы необходимо проанализировать влияние конвективного теплообмена в прямоугольной области, что наглядно видно на графических объектах. Поэтому для исследования выбрано программное обеспечение MatLab, так как в нем встроен графический модуль, что исключает необходимость использовать дополнительные программы для построения зависимостей. Фонд заработной платы:

$$\Phi ЗП = ЗП_{осн} + ЗП_{доп}, \quad (7)$$

$$\Phi ЗП = 120038 + 12000,38 = 132042,1 \text{ руб}$$

Расчет отчислений от фонда оплаты труда

Отчисления по заработной плате определяются по следующей формуле:

$$C_{соц} = K_{соц} \cdot \Phi ЗП, \quad (8)$$

где $K_{соц}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного страхования и пр.). Данный коэффициент составляет 30% от затрат на заработную плату.

$$C_{соц} = 0,3 \cdot 132042,1 = 39612,63 \text{ руб.}$$

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 $\mathcal{E}_{об}$ рассчитываются по формуле

$$\mathcal{E}_{об} = P_{об} \cdot C_{э} \cdot t_{об}, \quad (9)$$

где $P_{об}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$C_{э}$ – тарифная цена за 1 кВт·час, принимаем $C_{э} = 1,8 \text{ руб/кВт} \cdot \text{час}$;

$t_{\text{ОБ}}$ – время работы оборудования, час.

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

$$t_{\text{ОБ}} = T_{\text{РД}} \cdot 8, \quad (10)$$

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

Мощность, потребляемая оборудованием $P_{\text{ОБ}}$, принимаем равную мощности блока питания компьютера и монитора

$$P_{\text{ОБ}} = P_{\text{БП}} + P_{\text{М}}, \quad (11)$$

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

$$\mathcal{E}_{\text{ОБ}} = 0,5 \cdot 1,8 \cdot 680 = 612 \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию для освещения помещения, где осуществлялось выполнение проекта $\mathcal{E}_{\text{ОС}}$, рассчитываются по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{ОС}} = P_{\text{ОС}} \cdot \text{Ц}_{\mathcal{E}} \cdot t_{\text{ОС}}, \quad (12)$$

где $P_{\text{ОС}}$ – мощность, потребляемая осветительными приборами, кВт;

$t_{\text{ОС}}$ – время работы осветительных приборов, час.

Мощность, потребляемая освещением $P_{\text{ОС}}$, определяется по формуле

$$P_{\text{ОС}} = P_{\text{УСТ.ОС}} \cdot K_{\text{С}}, \quad (13)$$

где $P_{\text{УСТ.ОС}}$ – установленная мощность осветительных приборов,

принимаем $P_{\text{УСТ.ОС}} = 1,28 \text{ кВт}$;

$K_{\text{С}}$ - коэффициент спроса для внутреннего освещения,

принимаем $K_{\text{С}} = 0,9$.

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

Время работы освещения t_{OC} , час, определяется по формуле

$$t_{OC} = t_{СУТ} \cdot T, \quad (14)$$

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

T – время, затраченное на проведение работ,

принимая $T = 85$ дней.

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

$$\mathcal{E}_{OC} = 1,15 \cdot 1,8 \cdot 425 = 881,28 \text{ руб.}$$

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

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{OB} + \mathcal{E}_{OC}, \quad (15)$$

$$\mathcal{E} = 612 + 881,28 = 1561,28 \text{ руб.}$$

Следующим этапом расчёта затрат является расчет амортизационных расходов

Амортизационные отчисления рассчитываются на время использования ЭВМ по формуле

$$C_{AM} = \frac{N_A \cdot C_{OB}}{F_D} \cdot t_{BT}, \quad (16)$$

где N_A – годовая норма амортизации,

принимая $N_A = 25\%$;

C_{OB} – цена оборудования,

исходя из таблицы 4 принимаем $C_{OB} = 25000$ руб.;

F_D – действительный годовой фонд рабочего времени,

принимаем $F_D = 2416$ часов;

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

$$C_{AM} = \frac{0,25 \cdot 25000}{2416} \cdot 832 = 2152,32 \text{ руб.}$$

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:

$$C_{ПРОЧ} = (C_{МАТ} + C_{ОСН} + C_{СОЦ} + Э + C_{АМ}) \cdot 0,16, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} C_{ПРОЧ} &= (73700 + 120038 + 39612,63 + 1561,28 + 2152,32) \cdot 0,16 = \\ &= 37930,32 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Определим общую себестоимость НИР путем сведения рассчитанных статей расчета в смету (таблица 6).

Таблица 9 – Смета затрат на НИР

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
1	2	3
Материалы и покупные изделия	$C_{МАТ}$	56037,66
Фонд оплаты труда	$C_{ОСН}$	120 038
Отчисления из ФОТ	$C_{СОЦ}$	39612,63
Расходы на электроэнергию	Э	1561,28
Амортизационные отчисления	$C_{АМ}$	2 152,32
Работы, выполняемые сторонними организациями	$C_{СТОП}$	–
Прочие расходы	$C_{ПРОЧ}$	37930,32

Итого:		257332,21
--------	--	-----------

Таким образом, расходы на НИР составили: $C = 257332,21$ руб.

5.7. 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 (17)[1]:

$$H_i = \frac{t_{H_i}}{t_0} \cdot 100\%, \quad (17)$$

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

t_0 - общая трудоемкость.

Общая трудоемкость t_0 , вычисляется по формуле (18)[1]:

$$t_0 = \sum_{i=1}^n t_{ож_i}, \quad (18)$$

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

Удельный вес каждого этапа Y_i определяется по формуле (19)[1]:

$$Y_i = \frac{t_{ож_i}}{t_0} \cdot 100\%. \quad (19)$$

Результаты вычислений H_i и Y_i отражены в таблице 3.

Таблица 10 – 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 среде программирования	60,69	23,91
7	Отладка полученного программного комплекса	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 в плоть 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 сметы затрат расходы на НИР составили $C = 257332,21$ руб.

Данный проект является экономически эффективным, так как при затратах около четверти миллиона рублей позволяет спрогнозировать аварии на хранилищах сжиженного природного газа и тем самым предотвратить

потери объемом в стоимость постройки нового хранилища сжиженного природного газа и ущерба окружающей среде.

В ходе получения результатов расчета программы заказчики могут иметь представление о погрешностях уже разработанных хранилищ сжиженного природного газа и, при необходимости для предотвращения аварий, внести изменения в конструкцию или режим работы резервуаров СПГ.

В первой главе диссертации говорится, что при возникновении чрезвычайной ситуации в хранилище сжиженного природного газа (СПГ) и последующем его разрушении в следствии протекания необратимых физических процессов тепломассопереноса, наносится большой ущерб как самому хранилищу, так и окружающей среде из-за утечек СПГ в атмосферу. Исходя из этого видно, что затраты на разработку математической модели, позволяющей смоделировать процессы происходящие внутри хранилища, и предотвратить разрушение хранилища, незначительны по сравнению с возможными расходами необходимыми на восстановление хранилища после возникновения чрезвычайной ситуации.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Борисов Б.В., Стриха В.С., Скрыбинский Д.О., Смагулов К.А. Численное исследование теплообменников для ожижения или регазации метана с учетом его реальных свойств // Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий». – Томск: НиТПУ. – 2015.
2. Бондарчук С.С., Борисов Б.В., Скрыбинский Д.О., Стриха В.С., Использование метода С.К. Годунова для моделирования гидродинамики метана в состоянии насыщения или близком к состоянию насыщения // Материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий». – Томск: НиТПУ. – 2015.