

**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**

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Моделирование термодинамических параметров в двухфазной области метана в объеме при изохорном нагреве или охлаждении</b>

УДК 621.1.016.7:662.767.001.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<b>5Б2Б</b>	<b>Харченко Наталья Игоревна</b>		

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	Дашковский А.Г.	к.т.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  
Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой ТПТ  
Кузнецов Г.В.  
(Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы

Студент:

Группы	ФИО
<b>5Б2Б</b>	<b>Харченко Наталья Игоревна</b>

Тема работы:

**Моделирование термодинамических параметров в  
двухфазной области метана в объеме при изохорном  
нагреве или охлаждении**

Утверждена приказом ректора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

10.06.16

**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 – двухфазная область метана.  
Предмет исследования – моделирование термодинамических параметров метана при изохорном нагреве или охлаждении

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><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>Обзор и анализ литературы и научных публикаций по направлению исследования физических процессов в керамических заготовках.          Формулирование математической модели и выбор метода ее численной реализации.          Верификация программы          Проведение численного моделирования.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p>	<p>12 слайдов</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Попова Светлана Николаевна, доцент каф. МЕН</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Дашковский Анатолий Григорьевич, доцент каф. ЭБЖ</p>

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>26.02.2016</p>
--	-------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Борисов Б.В.	д.ф.-м.н		26.02.2016

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б2Б	Харченко Наталья Игоревна		26.02.2016

**Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы бакалавриата по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

Код резу- ль- тата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
Р1	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе <i>на иностранном языке</i> , разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты <i>комплексной</i> инженерной деятельности.
Р2	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе междисциплинарном, с делением ответственности и полномочий при решении <i>комплексных</i> инженерных задач.
Р3	Демонстрировать <i>личную</i> ответственность, приверженность и следовать профессиональной этике и нормам ведения <i>комплексной</i> инженерной деятельности с соблюдением правовых, социальных, экологических и культурных аспектов.
Р4	Анализировать экономические проблемы и общественные процессы, участвовать в общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм.
Р5	К достижению должного уровня экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения на производстве, безопасности жизнедеятельности и физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
Р6	Осознавать необходимость и демонстрировать <i>способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни</i> , непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии, организации обучения и тренинга производственного персонала.
<i>Профессиональные компетенции</i>	
Р7	Применять <i>базовые</i> математические, естественнонаучные, социально-экономические знания в профессиональной деятельности <i>в широком</i> (в том числе междисциплинарном) контексте в <i>комплексной</i> инженерной деятельности в производстве тепловой и электрической энергии.
Р8	Анализировать научно-техническую информацию, ставить, решать и публиковать результаты решения задач <i>комплексного</i> инженерного анализа с использованием <i>базовых и специальных</i> знаний, нормативной документации, современных аналитических методов, методов математического анализа и моделирования теоретического и экспериментального исследования.
Р9	Проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок объектов производства тепловой и электрической энергии, выполнять <i>комплексные</i> инженерные проекты с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, <i>современных</i> методов проектирования для достижения <i>оптимальных</i> результатов, соответствующих техническому заданию <i>с учетом</i> нормативных документов, экономических, экологических, социальных и других ограничений.
Р10	Проводить <i>комплексные</i> научные исследования в области производства тепловой и электрической энергии, включая поиск необходимой информации, эксперимент, анализ и интерпретацию данных, и их подготовку для составления обзоров, отчетов и научных публикаций с применением <i>базовых и специальных</i> знаний и <i>современных</i> методов.
Р11	Использовать информационные технологии, использовать компьютер как средство работы с информацией и создания новой информации, осознавать

	опасности и угрозы в развитии современного информационного общества, соблюдать основные требования информационной безопасности.
P12	Выбирать и использовать необходимое оборудование для производства тепловой и электрической энергии, управлять технологическими объектами, использовать инструменты и технологии для ведения комплексной практической инженерной деятельности с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений.
<i>Специальные профессиональные</i>	
P13	Участвовать в выполнении работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов теплоэнергетического производства, контролировать организацию метрологического обеспечения технологических процессов теплоэнергетического производства, составлять документацию по менеджменту качества технологических процессов на производственных участках.
P14	Организовывать рабочие места, управлять малыми коллективами исполнителей, к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, планированию работы персонала и фондов оплаты труда, организовывать обучение и тренинг производственного персонала, анализировать затраты и оценивать результаты деятельности первичных производственных подразделений, контролировать соблюдение технологической дисциплины.
P15	Использовать методики испытаний, наладки и ремонта технологического оборудования теплоэнергетического производства в соответствии с профилем работы, планировать и участвовать в проведении плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, в том числе, при освоении нового оборудования и (или) технологических процессов.
P16	Организовывать работу персонала по обслуживанию технологического оборудования теплоэнергетического производства, контролировать техническое состояние и оценивать остаточный ресурс оборудования, организовывать профилактические осмотры и текущие ремонты, составлять заявки на оборудование, запасные части, готовить техническую документацию на ремонт, проводить работы по приемке и освоению вводимого оборудования.

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 77 с., 15 рис, 11 табл., 52 источников, приложения отсутствуют.

Ключевые слова: теплоперенос, термодинамические параметры, хранение, численные моделирование.

Объектом исследования является: двухфазная область метана;

Цель работы – математическое моделирование термодинамических параметров при изохорном нагреве в метане.

В результате исследования были получены изменения термодинамических параметров при различных начальных условиях.

Степень внедрения: результаты внедрены в учебный процесс.

Область применения: резервуары для хранения сжиженного метана.

## Содержание

Введение.....	8
1. Обзор литературы .....	11
1.1 Получение и происхождение метана .....	11
1.2 Свойства метана .....	12
1.3 Применение метана.....	14
1.4 Кратка история хранилищ.....	15
1.5 Предпосылки низкотемпературного хранения .....	21
1.6 Особенности сжижения природного газа .....	23
1.7 Анализ нормативной базы в области хранения сжиженного метана ....	32
1.8 Изучение термодинамических свойств метана.....	35
2. Моделирование процесса .....	38
2.1 Физическая модель.....	38
2.2 Математическая модель .....	39
3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	43

## Введение

Газовая промышленность является молодой и быстро развивающейся отраслью, которая вбирает в себя самые выдающиеся достижения науки, технологии и техники. Её развитие сопровождается качественным совершенствованием всех направлений, связанных с добычей, переработкой, хранением и реализацией газа[1]

Задачи производства сжиженного природного газа (СПГ) имеет важную роль для России как перспективное направление в экономики страны. СПГ широко применяется не только в промышленности, но и для газоснабжения населения, на коммунально-бытовых и сельскохозяйственных предприятий [2]. Для многих удаленных населенных пунктов использование СПГ является более экономичным способом снабжения этих мест газом по сравнению с другими способами транспортировки газа. Также, на протяжении уже многих лет продолжается программа по применению СПГ как моторное топливо для транспорта [3].

При конструировании подготовительных комплексов и реализации сжиженного природного газа (СПГ) возникает проблема его хранения. После добычи первой большой промышленной партии СПГ в 1937 году появилась необходимость проектирования конструкций низкотемпературных хранилищ для сжиженного газа. Первым таким проектом стал низкотемпературный резервуар вместимостью 54,88 м<sup>3</sup> и был осуществлен в 1939 году в штате Вирджиния, США. Материалом для резервуара был сплав из стали с 2% - м содержанием никеля, а как тепловую изоляцию использовали пробковые плиты толщиной 750 мм. На сегодняшний момент при использовании сжиженного газа применяют различные конструктивно - технологические способы их хранения [4].

Основной компонент природного газа - это метан, объемное содержание которого составляет от 90 до 97% [5]. При проектировании криогенных циклов сжиженного ПГ необходимо учитывать этот факт.



Свойства ПГ в значительной степени определяются метаном. В первом приближении анализ процессов теплопереноса в хранилищах можно выполнять без учета влияния примесей на теплофизические свойства природного газа (ПГ). При разработке систем производства СПГ необходимо отметить то, что метан занимает переходное положение, по его теплофизическим свойствам, между традиционными продуктами разделения воздуха и рабочим телом паровых холодильных циклов, фреонами, аммиаком. Из-за этого уже при температуре окружающей среды свойства метана в большей степени отличаются от свойств идеального газа, чем свойства воздуха и его компонентов [4].

Для надежного и устойчивого использования системы газоснабжения на основе резервуарных установок сжиженного газа является присутствие в хранилищах избыточного давления. Исходя из практики отечественных и зарубежных предприятий по реализации СПГ необходимое избыточное давление в резервуарах принимается в размере 0,04—0,05 МПа (изб.). Таким давлением обеспечивается устойчивая и надежная работа установок регазификации и регулирования давления, подающих паровую фазу потребителю [1].

В Российской Федерации поставление потребителям сжиженного газа осуществляется в основном на базе групповых резервуарных установок с емкостями, расположенными под землей. При хранении сжиженного газа в резервуарных установках условия являются неизотермическими из-за воздействия температуры наружного воздуха и грунта. По этой причине важнейшую роль при реализации рациональных условий эксплуатации резервуарных систем газоснабжения играет изучение температурных условий хранения сжиженного природного газа в подземных и надземных резервуарах.

Одной из причин опасности сжиженного газа является его низкая температура кипения (110,7...111,5К), что является фактором, который не позволяет обеспечить его хранение без потерь, а также способствует

изменению плотности и других термодинамических параметров. Эти причины могут спровоцировать образование стратифицированных макрослоев СПГ в хранилищах при пополнении резервуаров, в которых имеются остатки топлива, новой порцией газа, с плотностью и температурой, различающиеся по аналогичным параметрам в остатке топлива [6,7]. При дальнейшем процессе тепломассообмена в стратифицированных слоях газа, которые приводят к изменению плотности, могут возникать режимы интенсивного перемешивания, названные «ролловер», в процессе которого происходит практически мгновенное испарение больших масс СПГ и резкое повышение давления в резервуаре, способное привести к разрушению хранилища с катастрофическими последствиями [8].

На основе вышесказанного, сформулированы цель работы, которая заключается в разработке программы для моделирования термодинамических параметров в метане при подводе или отведении тепла, на основе результатов которой можно достичь оптимального режима при хранении газа, что приведет к уменьшению скорости испарения жидкости в емкости, номинальное значение которого имеет значение 0,05% об./сут, и в свою очередь предотвратить начало развития процесса «ролловера» [3].

# 1. Обзор литературы

## 1.1 Получение и происхождение метана

Метан — простейший углеводород, бесцветный газ без запаха. Его химическая формула —  $\text{CH}_4$ . Малорастворим в воде, легче воздуха. При использовании в быту, промышленности в метан обычно добавляют одоранты со специфическим «запахом газа». Основной компонент природных (77—99%), попутных нефтяных (31—90%), рудничного и болотного газов (отсюда другие названия метана — болотный или рудничный газ) [9].

На 90–95% метан имеет биологическое происхождение. Травоядные копытные животные, такие как коровы и козы, испускают пятую часть годового выброса метана: его вырабатывают бактерии в их желудках. Другими важными источниками служат термиты, рис-сырец, болота, фильтрация естественного газа (это продукт прошлой жизни) и фотосинтез растений. Вулканы вносят в общий баланс метана на Земле менее 0,2%, но источником и этого газа могут быть организмы прошлых эпох [10].

Промышленные выбросы метана незначительны. Таким образом, обнаружение метана на планете типа Земли указывает на наличие там жизни.

Метан образуется при термической переработке нефти и нефтепродуктов (10—57% по объёму), коксовании и гидрировании каменного угля (24—34%) [11]. Лабораторные способы получения: сплавление ацетата натрия со щелочью, действие воды на метилмагниййодид или на карбид алюминия.

В лаборатории получают нагреванием натронной извести (смесь гидроксидов натрия и калия) или безводного гидроксида натрия с уксусной кислотой. Для этой реакции важно отсутствие воды, поэтому и используется гидроксид натрия, так как он менее гигроскопичен [11].

## 1.2 Свойства метана

Метан — бесцветный газ, в жидком состоянии его плотность меньше плотности воды (уд. вес. 0,4). В соответствии с правилом подобное растворяется в подобном он очень плохо растворим в воде, но хорошо растворим в органических жидкостях, таких, как бензин, эфир и спирт. Физические свойства метана сходны со свойствами других членов ряда алканов. [12]

Сжиженный метан получается путем охлаждения до минус 162°С. В процессе сжижения плотность газа увеличивается почти в 600 раз, что повышает удобство хранения и транспортировки. Средняя плотность СПГ составляет 440 кг/м<sup>3</sup>. В жидкой форме природный газ не имеет способность взрываться или воспламеняться, а при испарении может воспламениться только в случае контакта с источником горения и если концентрация газа в воздухе будет составлять от 5% до 15%.

Взрывное горение распространяется со скоростью 500—700 м/сек; давление газа при взрыве в замкнутом объеме равно 1 Мн/м<sup>2</sup>. После контакта с источником тепла воспламенение метана происходит с некоторым запаздыванием [12]. На этом свойстве основано создание предохранительных взрывчатых веществ и взрывобезопасного электрооборудования. На объектах, опасных из-за присутствия метана (главным образом, угольные шахты), вводится т.н. газовый режим. При 150-200 °С и давлении 30-90 атм метан окисляется до муравьиной кислоты [13].

Углеводородные газы резко отличаются друг от друга по температурам кипения. Метан может перейти в жидкое состояние лишь при очень низких температурах. Жидкий метан кипит и превращается в газ лишь при температуре —161° С. Критическая температура метана —82° С. Следовательно, в толщах горных пород, где температура выше 0° С, ни при каком давлении метан не перейдет в жидкое состояние. Этан кипит при довольно низкой температуре (—88° С), но его критическая температура 32°

С, поэтому при температуре более низкой чем  $32^{\circ}\text{C}$  и при достаточном давлении этан может перейти в жидкое состояние. Еще легче переводят в жидкое состояние пропан, бутан и изобутан. Например, для того чтобы при комнатной температуре перевести эти углеводороды в жидкое состояние, требуется давление для пропана 7—8 ат, для изобутана около 3 ат и для бутана около 2 ат. В табл. 6 приведены основные физические свойства углеводородных и некоторых других газов. [12]

### 1.3 Применение метана

Метан является наиболее термически устойчивый насыщенный углеводород. Его широко используют как бытовое и промышленное топливо и как сырьё для промышленности. Так, хлорированием метана производят метилхлорид, метиленхлорид, хлороформ, четырёххлористый углерод.

При неполном сгорании метана получают сажу, при каталитическом окислении — формальдегид, при взаимодействии с серой — сероуглерод.

Термоокислительный крекинг и электрокрекинг метана— важные промышленные методы получения ацетилена.

Каталитическое окисление смеси метана с аммиаком лежит в основе промышленного производства синильной кислоты. Метан используют как источник водорода в производстве аммиака, а также для получения водяного газа (т. н. синтез-газа):  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ , применяемого для промышленного синтеза углеводородов, спиртов, альдегидов и др. Важное производное метана — нитрометан [14].

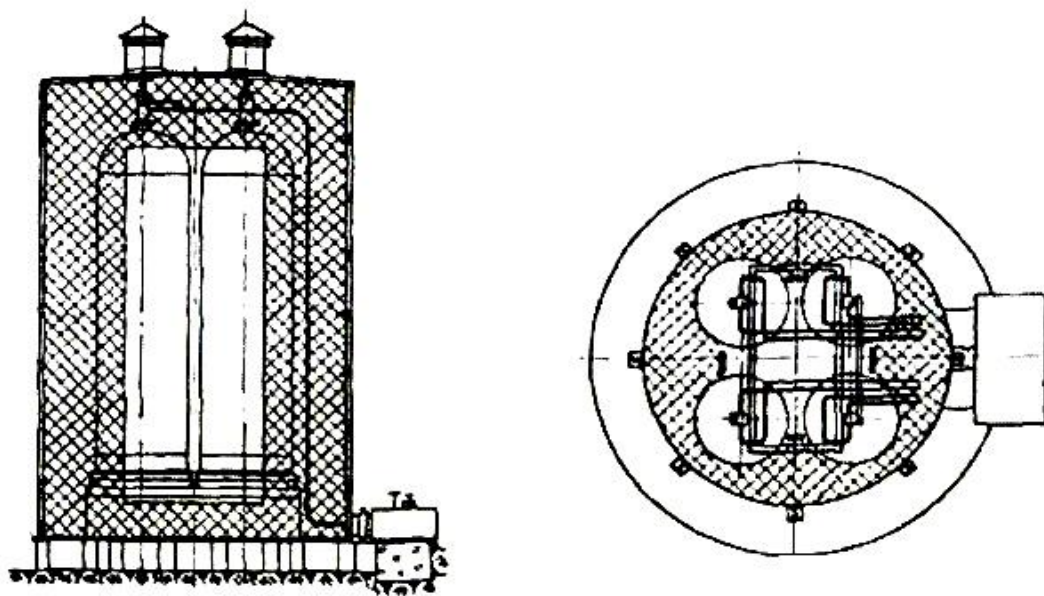
Метан широко используется в качестве моторного топлива для автомобилей. Однако плотность природного метана в тысячу раз ниже плотности бензина. Поэтому, если заправлять автомобиль метаном при атмосферном давлении, то для равного с бензином количества топлива понадобится бак в 1000 раз больше. Чтобы не возить огромный прицеп с топливом, необходимо увеличить плотность газа. Это можно достичь сжатием метана до 20–25 МПа (200–250 атмосфер). Для хранения газа в таком состоянии используются специальные баллоны, которые устанавливаются на автомобилях [15].

## 1.4 Кратка история хранилищ

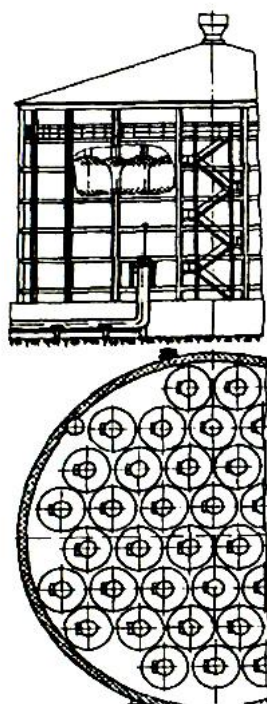
Первое хранилище сжиженного метана было спроектировано и изготовлено в США штат Виргиния в 1939 году. В течении четырех месяцев сжиженный газ хранился в горизонтальном резервуаре цилиндрической формы с объемом примерно 60 м<sup>3</sup>. Внутренние стенки резервуара, изготовленные из стали с содержанием никеля 2%, были изолированы пробковыми плитами 600 мм толщиной. В 1941 г. недалеко от Кливленда была сооружена система хранилищ сжиженного метана, состоящая из четырех резервуаров, общая емкость которых составляла 15 450 м<sup>3</sup>. Высота трех из этих резервуаров составляла около 13 м, с диаметром наружной оболочки около 22 м и емкостью 3960 м<sup>3</sup> каждый. Изоляцией для них являлись пробковые плиты. Четвертый резервуар отличался от остальных. Его емкость была 3600 м<sup>3</sup>, имел необычную форму и стоял на вертикальных сосновых стойках, которые образовывали два концентрические окружности. В качестве изоляции для этого резервуара была использована минеральная шерсть. В 1944 г. на этом резервуаре произошла авария, причины которой невыяснены, в результате которой он взорвался и сгорел. После этого случая строительство подобных резервуаров было приостановлено [16].

В советской истории первый завод сжиженного газа появился в 1954 г., строительство которого предполагало два низкотемпературных хранилища, одно из которых проектировалось как оперативное (малое хранилище)(рис.1), а второе - для длительного хранения (большое хранилище)(рис.2). Малое хранилище состояло из блоков, каждый из которых представлял собой четыре вертикальные цилиндрические резервуары для сжиженного метана. Высота таких сосудов равна 13 м с диаметром 3 м. Все резервуары снабжены индивидуальной арматурой, которая расположена в верхней части, и обслуживается со специального

моста. Нижняя часть резервуара заглублена в грунт, теплоизоляция из мипора является общим для каждого блока из четырех резервуаров. В результате наружного теплопритока потери на испарение были примерно 0,16% от всей емкости резервуаров.



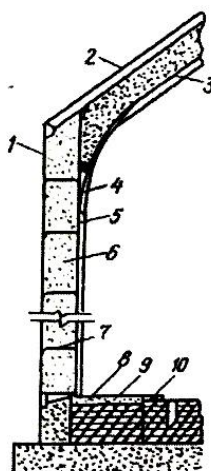
*Рисунок 1 – Блок малого хранилища жидкого метана*



*Рисунок 2 – Блок большого хранилища жидкого метана*



Блок большого хранилища состоял из пакета из 42 вертикальных цилиндрических сосудов, вмещающий 32 т сжиженного метана каждый. Теплоизоляция представляла собой ограждение из плит мипоры и наружного кожуха, который был снабжен конической кровлей. Для управления арматурой предполагался специальный настил, расположенный вверху, и был общим для всего блока. Первый изотермический резервуар был сооружен в конце 50-х годов. Он представлял собой металлический резервуар с «самонесущей» конструкцией (рис.3).



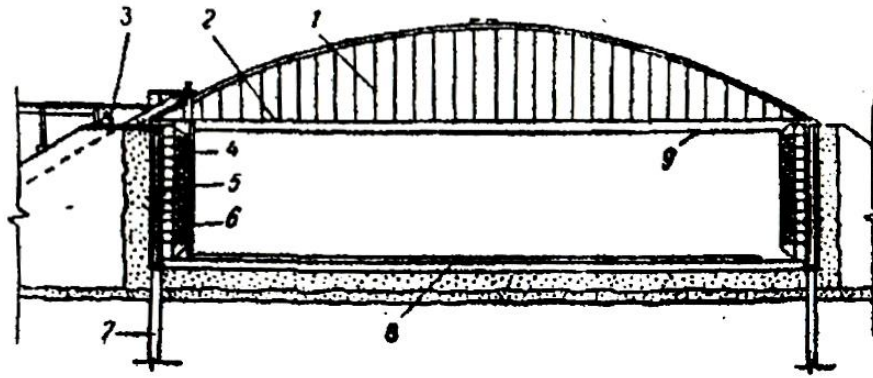
*Рисунок 3 – Схема наземного изотермического резервуара с герметичным корпусом самонесущей конструкции: 1- наружный металлический корпус; 2- наружная металлическая крышка; 3 – внутренняя крышка; 4 – переходная панель, которая соединяет крышку с корпусом; 5 – внутренний герметичный корпус из стали с 9% никеля; 6 – перлитовая изоляция; 7 – стержни, которые связывают наружный и внутренний корпус резервуара; 8 – металлическое дно резервуара; 9 – панель из бетона; 10 – теплоизоляционный блок дна.*

Такой резервуар предполагал герметичный барьер (внутренний корпус из 9%-ной никелевой стали), принимающий на себя нагрузку кровли, герметическое давление газа, термические напряжения, и вторичный барьер

(наружный корпус), состоящий из стали или железобетона и слоя перлитовой теплоизоляции между ними.

Исходя из практики было понятно, что для обеспечения необходимой безопасности хранения больших объемов сжиженного газов в изотермических резервуарах необходимы наиболее надежные и прочные материалы для корпуса, которые могли бы позволить решить одновременно проблемы хрупкости металла при низких температурах, сопротивление термическим ударам и высокие мгновенные перепады давления при аварийных ситуациях. В виду этих причин были спроектированы принципиально новые конструкции резервуаров. Эти изотермические резервуары имели первичную тонкую мембранную оболочку, которая выполняла функцию герметизации, а гидростатическое давление продукта и термические напряжения передавала на прочный корпус. Кровля для таких резервуаров изготавливалась из углеродистой стали, которая крепилась на прочном (металлическом или железобетонном) корпусе. К кровле крепился плоский потолок из алюминия с теплоизоляцией из стекловолокна, из-за чего крыша хранилища подвергалась только воздействию температуры окружающей среды. Материалом для первичной мембранной оболочки корпуса резервуара служила никелевая нержавеющая сталь или алюминиевые сплавы [17].

В 1965 году в США после строительства станции, покрывающей пики неравномерности газопотребления близи Бермингема в 1964г., был спроектирован резервуар с емкостью 56 600 тыс.м<sup>3</sup> из предварительно напряженного бетона для хранения сжиженного газа. Высота такого резервуара (рис.4) составляла 18 м, а внутренний диаметр 80,5 м.



*Рисунок 4 – Железобетонный резервуар емкостью 56600 тыс. м<sup>3</sup>: 1 – стержни; 2 – изоляция; 3 – компрессор; 4 – перекачивающие насосы; 5 – слой изоляции; 6 – гибкие фермы; 7 – сваи; 8 – фундамент; 9 – уровень жидкости.*

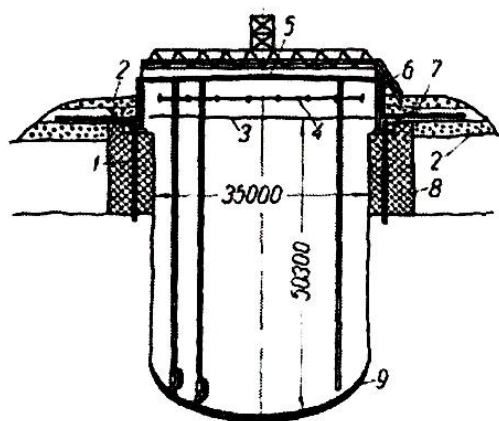
Резервуар был спроектирован с самонесущим куполом (металлический или железобетонный) и оболочкой, поддерживаемой стержнями. Изоляционный слой предусматривался между продуктом и железобетонной стенкой, толщина которой составляла 60 см.

Резервуар был наполовину заглублен в грунт и обваливался. Проектирование такого резервуара предусматривало наличие системы рециркуляции испаряющегося газа и системы повторного сжижения газа и его возврат. Строительство резервуара завершилось в середине 1967 г.

Н.Купер (США) был первым, кому пришла идея создания грунтовых резервуаров для сжиженного метана. Созданный им тип безопасного резервуара был спроектирован со значительно глубокой выработкой (довольно ниже поверхности). Изоляция стенок грунта состояла из паронепроницаемых листовых или рулонных материалов. Выработка конструировалась так, чтобы сохранялся угол естественного откоса грунта. Кровлей для такого резервуара служила коническая или сфероидальная металлическая крышка, плотно сопрягаемая с грунтом.

Крупнейшим льдогрунтовым хранилищем сжиженного метана было сооружено в Нью-Йорке (США) с емкостью 46,7 тыс.м<sup>3</sup>. Хранилище было выполнено цилиндрической формы на глубине 50,3 м и диаметром 35 м. Резервуар был окружен бетонной стенкой, высота которой достигала 4 м над поверхностью и заглублялась на 0,9м в землю. Хранилище предназначалось для покрытия пиковых нагрузок в зимний период времени.

В истории российских хранилищ, проект льдогрунтового хранилища с емкостью 10 тыс. м<sup>3</sup> был разработан ВНИИпромгазом. Металлическое стальное покрытие было спроектировано из каркаса, к фермам которого был подвешен на цепях герметизирующий диск, выполненный из лигированной стали, с теплоизоляционным слоем (рис.6) [18].



*Рисунок 5 – льдогрунтовое хранилище объемом 10 тыс. м<sup>3</sup>: 1 – морозильный трубы; 2 – песчаная подсыпка; 3 – уровень жидкости; 4 – струйные насадки; 5 – крышка хранилища; 6 – пояс из нержавеющей стали; 7 – теплоизоляционный слой; 8 – льдогрунтовая оболочка; 9 – изоляция.*

## 1.5 Предпосылки низкотемпературного хранения

Хранение сжиженного природного газа и других продуктов высокой упругости паров при низких температурах и давлениях привлекают внимание специалистов возможностью значительного сокращения удельных капиталовложений [19]. Из одного объема СПГ при регазификации образуется примерно 600 объемов обычного газа. Превращение природного газа в жидкость позволило сделать СПГ важным энергетическим источником. Существуют два варианта использования хранилищ СПГ:

-подготовка СПГ к перевозке из стран, имеющих крупные месторождения природного газа, в страны, испытывающие большую потребность в природном газе и не имеющие собственных крупных месторождений,

-создание резерва газа для покрытия сезонных колебаний в потреблении [20].

Давление паров сжиженных газов уменьшается с понижением температуры. При определенной низкой температуре газ можно хранить уже не при повышенном давлении, а при атмосферном. Искусственное снижение температуры и давления хранимого газа требует затрат определенного количества энергии. В технологической схеме изотермического хранилища имеются циркуляционные холодильные циклы, а одним из важнейших элементов системы изотермических хранилищ является компрессорно-холодильное оборудование. Холодильный цикл и технологическую схему выбирают в зависимости от назначений газохранилища, состава сжиженного газа и других характеристик установок сжижения. Термодинамические свойства хранимых газов позволяет использовать сжиженный продукт в качестве холодильного агента. На крупных установках сжижения применяют

каскадные холодильные циклы, которые, несмотря на их сложность в технологическом отношении, характеризуются минимальными энергетическими затратами. Компрессорно-холодильное оборудование изотермического хранилища обеспечивает восполнение холода, теряемого в результате теплопритока через поверхность ограждающих конструкций в цикле хранения, и отвод теплоты, поступающий в цикл заполнения с продуктом [21].

## 1.6 Особенности сжижения природного газа

При разработке криогенных циклов сжижения ПГ необходимо учитывать то, что эта газовая смесь с содержанием метана не менее 90 %. Свойства метана в значительной степени определяют свойства ПГ. В первом приближении анализ основ энергоэффективности ожижительных циклов можно выполнить без учета влияния примесей на теплофизические свойства природного газа (ПГ). При проектировании систем получения СПГ нельзя не отметить то, что по своим теплофизическим свойствам метан занимает промежуточное положение между традиционными продуктами разделения воздуха и рабочими телами паровых холодильных циклов, фреонами, аммиаком и т.п. Из-за этого при получении жидкого природного газа оказываются неэффективными традиционные для криогенной и холодильной техники циклы. Например, уже при температуре окружающей среды свойства метана в большей степени отличаются от свойств идеального газа, чем свойства воздуха и его компонентов [22].

Критическая температура метана составляет всего 190,5 К, что значительно выше критической температуры воздуха ( $T_{кр}=132,3$  К) [4]. Вторым свидетельством существенности отличия свойств метана от свойств идеального газа являются высокие значения коэффициента сжимаемости при комнатных температурах. При 298 К коэффициент сжимаемости при давлении 15,0 МПа составляет 0,82, а при температуре 273 К и давлении 20,0 МПа коэффициент сжимаемости метана составляет 0,76 [23]. При дросселировании метана значение полученного эффекта Джоуля-Томсона оказывается в несколько раз больше, чем у воздуха при тех же условиях. При давлении 20 МПа и температуре 293 К дроссельный эффект для метана составляет 178,8 кДж/кг, а у воздуха только 34,7 кДж/кг, т.е. в 5 раз меньше [23]. Высокая эффективность процесса дросселирования метана указывает на то, что для получения СПГ можно использовать даже простейший цикл высокого давления с однократным дросселированием. Можно ожидать, что

циклы высокого и среднего давления с адиабатическим расширением газа [23] не смогут дать существенного снижения затрат энергии на ожижение, как это бывает в случае, когда рабочим телом является воздух. В координатах T-S имеет линии постоянных энтальпий метана при высоких давлениях приближаются к линиям адиабатного расширения, поэтому энергетический выигрыш от использования детандерной ступени охлаждения существенно меньше, чем в тех случаях, когда рабочим телом цикла является воздух. Удельные затраты энергии на ожижение метана в различных циклах глубокого охлаждения приведены в табл. 1 [24].

Данные таблицы показывают, что наиболее экономичным способом сжижения метана является каскадный цикл. Например, цикл, состоящий из трех ступеней: аммиачной, этиленовой и метановой [23] (см. рис. 6).

*Таблица 1 - Расход энергии для сжижения метана при различных циклах глубокого охлаждения*

Цикл глубокого охлаждения	Расход энергии, квт·ч/л СН <sub>4</sub>
С однократным дросселированием	2,70
Высокого давления с детандером	1,67
С циркуляцией воздуха высокого давления (в. д)	1,62
С однократным дросселированием и аммиачным охлаждением	1,30
С циркуляцией воздуха в.д. и аммиачным охлаждением	1,18
Каскадный цикл (аммиак, этилен и метан)	0,90

В аммиачной ступени внешнего охлаждения избыточное давление рабочего тела изменяется от 0,05 до 0,9 МПа. В этиленовой ступени давление рабочего тела колеблется в пределах 0,1–1,3 МПа, а давление метана на стороне всасывания компрессора составляет 0,1 МПа, на выходе из компрессора поток метана сжат до давления 2,5 МПа. Материальный

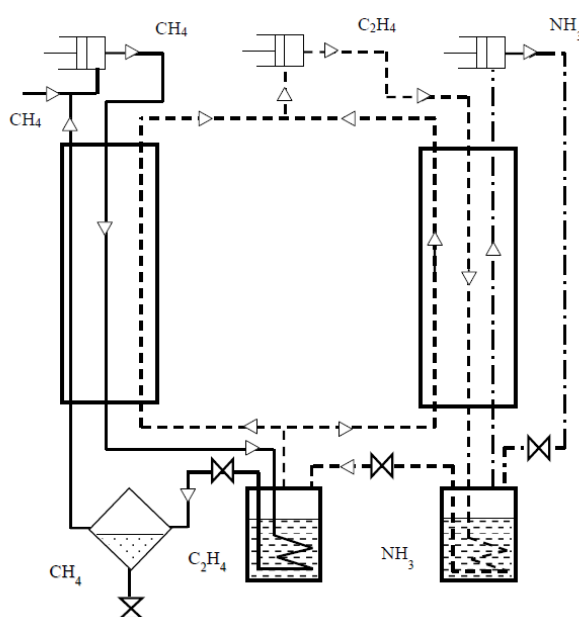


баланс в метановом цикле поддерживается за счет подвода газообразного метана в линию всасывания компрессора. Для сжижения 1 моля метана 1,8 моля в низкотемпературном контуре должно циркулировать 1,8 молей метана. Удельный расход этилена в среднетемпературном контуре составляет 2 моль/моль. В аммиачном контуре удельный расход газа составляет 0,7 моль/моль. Для наглядности можно рассчитать удельные значения объемного расхода рабочего тела для каждого контура [22].

Удельный объемный расход рабочих веществ при давлении обратного потока составит: в аммиачном контуре 0,53 м<sup>3</sup>/кг, в этиленовом контуре 2,8 м<sup>3</sup>/кг; в метановом контуре 2,51 м<sup>3</sup>/кг. Сведения об удельном объемном расходе рабочего вещества в промежуточных ступенях каскадного цикла ожижения метана объясняют почему, несмотря на высокую энергоэффективность, этот цикл не находит широкого практического применения. Для производства жидкого метана два дополнительных компрессорных агрегата с объемной производительностью, сопоставимой с производительностью основной ступени охлаждения. При крупнотоннажном производстве СПГ это существенный недостаток. Например, при годовой производительности  $10 \cdot 10^6$  тонн в год производительность компрессора этиленовой ступени должна составлять  $3170 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup>/час, а компрессор аммиачной ступени –  $600 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup>/час.

Судя расходным характеристикам это турбомашины с гигантскими размерами. С учетом этих обстоятельств каскадный цикл ожижения метана в основном используется в качестве теоретического эталона энергоэффективности. Обзор литературы показывает, что при крупнотоннажном производстве СПГ используют циклы ожижения с использованием в качестве рабочего тела составленной на основе метана, сложной газовой смеси. Варьируя состав смеси и концентрацию компонентов, разработчики добиваются сокращения числа ступеней охлаждения и повышения энергоэффективности процесса получения СПГ.

Тенденция в области разработки энергоэффективных циклов СПГ отражает обзор технологических решений компании «AIR PRODUCTS» [24]. Отличительной особенностью схемных решений компании «AIR PRODUCTS» является то, что почти все они построены с использованием контуров, в которых в качестве рабочего тела используется смесь метана с другими газами. Это позволяет ожижительным циклам в большей или меньшей степени приблизиться по энергоэффективности к каскадному циклу, который используется в качестве эталона рационального использования энергии [24]. Вторым отличием ожижителей компании «AIR PRODUCTS» является то, что они рассчитаны на крупнотоннажное производство СПГ на заводах, расположенных вблизи морского терминала. ПГ поступает на такие заводы по трубопроводам различной протяженности. Из-за этого давление ПГ на входе в цикл ожижения существенно выше атмосферного и составляет от 2,0 до 6,0 МПа.



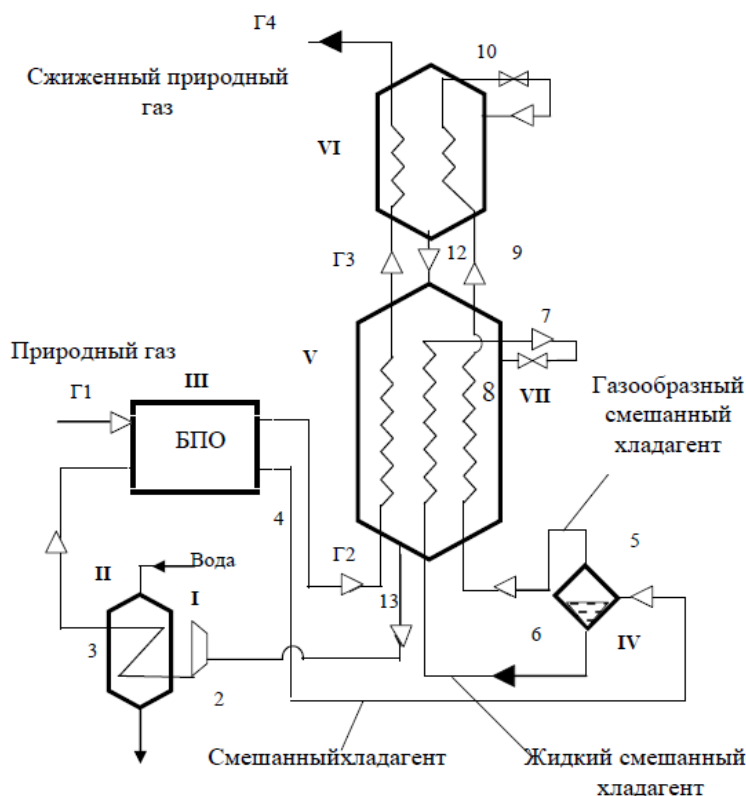
*Рисунок 6 - Каскадный цикл ожижения метана с использованием этилена и аммиака в качестве промежуточных хладагентов.*

То, что сырье поступает на ожижение под существенным давлением, значительно снижает затраты энергии на заводах СПГ, упрощается решение вопросов предварительной подготовки ПГ – удаление примесей H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>.

В приводимых ниже схемных решениях блоки комплексной очистки ПГ отсутствуют. Газ поступает непосредственно в систему охлаждения. Такой подход к формированию ожижительных систем для ПГ иллюстрирует схема установки, приведенная на рис. 7. Природный газ поступает в блок предварительного охлаждения (БПО), задача которого переохладить сырье и циркуляционный поток смешанного хладагента до температурного уровня 240 К. Компания «AIR PRODUCTS» предлагает несколько вариантов исполнения БПО, которые различаются составом рабочего тела и принципом действия [25]. Переохлажденный ПГ направляется в основной теплообменник V, где переохлаждается до температуры конденсации. Сжиженный ПГ поступает в теплообменник-переохладитель VI и далее в емкости-накопители. Охлаждение ПГ в основном теплообменнике обеспечивается за счет отвода обратному потоку смешанного хладагента. Этот поток образуется за счет смешения газового потока, поступающего из теплообменника-переохладителя VI и двухфазного потока, полученного в результате дросселирования высококипящей фракции хладагента.

Авторы [25] не раскрывают техническую суть второстепенных этапов цикла ожижения ПГ на смешанном хладагенте. В частности не ясно, каким образом организована утилизация теплоты перегрева обратного потока хладагента от температуры  $T_{13} \sim 240$  К до температуры  $T_2$  на линии всасывания турбокомпрессора I, которая должна быть примерно равна окружающей среде. В схеме, приведенной на рис. 7,  $T_2 \sim T_{13} \sim T_4 = 240$  К, потери от поступления недогретого хладагента в турбокомпрессор составят около 110 кДж/кг. Возможным объяснением этого «недостатка» схемы ожижения ПГ является то, что компанией «AIR PRODUCTS» разработано несколько альтернативных вариантов исполнения БПО [8–10], в том числе БПО на базе цикла бромисто-литиевой холодильной машины, паровых циклов на пропане или фреонах. Возможно, схема на рис. 7 отражает вариант с бромисто-литиевой ХМ. В этом случае прямой поток перед основным теплообменником имеет температуру не ниже 280 К, т.е. на 40 К

выше, чем в рассмотренном примере. При таком температурном уровне потери от недорекуперации снижаются до разумной величины, но возникают сомнения в работоспособности второй ступени переохлаждения ПГ (в основном теплообменнике). При температуре 280 К из смешанного хладагента в отделителе жидкости IV может сконденсироваться только пропановая фракция.

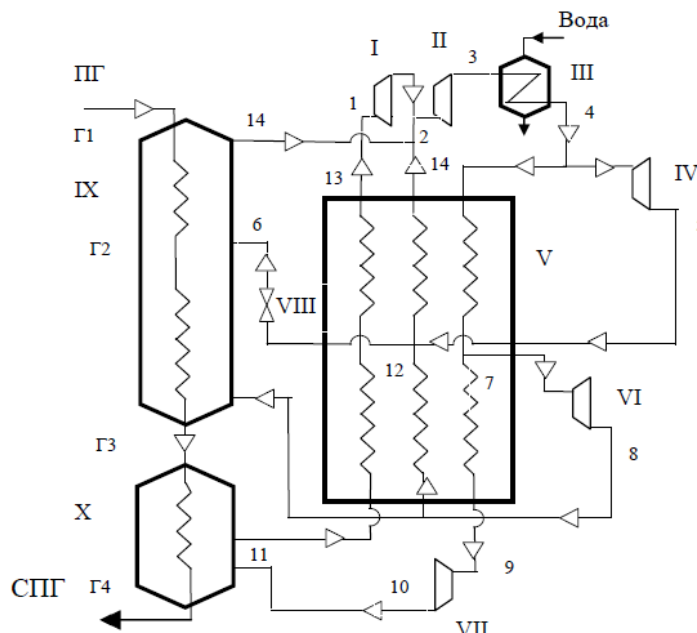


*Рисунок 7 - Установка получения СПГ с блоком предварительного охлаждения и ожижительным контуром на смешанном хладагенте.*

После дросселирования через вентиль VII температура этой фракции хладагента не может опуститься до уровня ниже 230 К (температура кипения пропана при нормальных условиях [23]). Такой температуры недостаточно для того, чтобы аппарат V мог обеспечить сжижение ПГ. БПО с использованием пропана или фреона приближает цикл ожижения к классическому каскадному циклу, так как для работы БПО такого типа потребуется еще один компрессорный агрегат. Применение БПО на базе пропана позволяет использовать для пополнения запасов высококипящего

хладагента перерабатываемое сырье, но повышает уровень пожароопасности производства СПГ. Замена пропана фреонами требует организации подвоза и хранения хладагента при остановке ожижителя. Применительно к решению задачи импортозамещения можно сделать вывод о том, что рассмотренная схема производства СПГ имеет ряд скрытых решений в стиле «knowhow», которые защищают данную технологию от копирования.

Важнейшее значение имеет то, что состав смешанного хладагента практически неизвестен, что не позволяет выполнить тепловой и конструктивный расчет аппаратов ожижителя ПГ. С точки зрения возможности реализации на отечественных заводах СПГ определенный интерес представляет установка ожижения ПГ, представленная на рисунке 8. В этом цикле ожижения использован сложный рефрижераторный цикл, в котором в качестве рабочего тела используется газообразный азот.



*Рис. 8. Ожижитель природного газа с рефрижератором на базе азотного детандерного цикла*

Наряду с турбокомпрессором I, II, холодопроизводительность рефрижератора создают три турбодетандера IV, VI, VII. Расширительные

машины работают на разных температурных уровнях, что позволяет сформировать три ступени охлаждения ПГ. Первый турбодетандер IV расширяет газ с температурой окружающей среды от максимального (P3) до промежуточного давления P2. Эта ступень охлаждения обеспечивает достижение температурного уровня  $T5 \approx 230-240$  К. Второй детандер VI расширяет азот, предварительно охлажденный за счет отвода теплоты в первой секции теплообменника V до уровня  $T7 \approx 240$  К. Начальное давление потока равно давлению на выходе из последней ступени компрессора P3, после детандера давление азота снижается до уровня всасывания в среднюю секцию компрессора P2. Температура потока после детандера составляет 110–120 К. Третий детандер VII расширяет газ с давлением P3 и температурой  $T9 \approx 130-140$  К до уровня линии всасывания в первую ступень компрессора P1. Поток низкого давления направляется в теплообменник-переохладитель X, а затем в основной теплообменник рефрижераторного цикла IX. Поток азота после детандеров IV и VI делится на две части. Одна часть направляется в теплообменник V для переохлаждения прямого потока азота. Вторая часть потоков газа после детандеров IV и VI направляется в теплообменник-ожижитель IX. Давление потока азота после детандера IV выше давления в межтрубном пространстве теплообменник IX, поэтому на этот поток дросселируется через вен-тиль VIII. Несмотря на относительную сложность схемы движения материальных потоков в рефрижераторе, ожижитель, в котором используется простое рабочее тело (газообразный азот) может быть рас-считан и спроектирован без проведения предварительных экспериментальных исследований. К сожалению, сотрудники компании «AIR PRODUCTS» скрыли ряд характеристик ожижителя ПГ. В частности не определены давления:

- в потоке сырья на входе в теплообменники IX и X;
- в потоке азота в точках 1, 2, 3.

Судя по схеме давление ПГ в точках Г1, Г2, Г3, Г4 одинаковы, а давление в точке Г4 близко к атмосферному. Однако это противоречит условиям работы заводов СПГ, куда газ поступает под существенным давлением [26], которое необходимо снизить до теплообменника X. Однако, эти вопросы могут быть решены путем построения математической модели ожижителя с азотным рефрижератором. В завершение обзора способов ожижения ПГ, пригодных для использования в программе импортозамещения можно воспользоваться данными компании «AIR PRODUCTS» об энергоэффективности новых крупнотоннажных ожижителей. Полагая, что каскадный цикл обладает максимально возможной энергетической эффективностью в процентах от аналогичного показателя каскадного цикла [27]. На гистограмме приведены значения относительной энергоэффективности каскадного цикла (КЦ), цикла со смешанным хладагентом и БПО (ЦСХ БПО), азотного рефрижераторного цикла (АРЦ) и азотного рефрижераторного цикла с БПО (АРЦ БПО).

Из гистограммы видно, что энергоэффективность АРЦ блока предварительного охлаждения СПГ на 25 % ниже максимума. Использование в составе АРЦ блока предварительного охлаждения на фреонах или пропане повышает энергоэффективность АРЦ БПО до 80 %. На современном этапе развития отрасли производства СПГ азотные рефрижераторные циклы ожижения представляются наиболее реалистичным направлением решения задачи импортозамещения при строительстве заводов СПГ.

## **1.7 Анализ нормативной базы в области хранения сжиженного метана**

Тремя центрами развития технологий СПГ и разработки стандартов признаны Американский континент (Канада, США), Австралия и Европа. Созданный там стандарты регламентируют широчайший круг вопросов, которые относятся к конструктивным и технологическим требованиям, проектированию и безопасности при хранении и реализации газа. В совокупности все эти стандарты дают буквально энциклопедические сведения о СПГ всем, кто работает в данной области. Анализируя эти стандарты, можно отчетливо усмотреть следующие тенденции: стремление, с одной стороны, к учету национальных особенностей технического подхода, а с другой – к их международной унификации [28].

Российская система стандартизации имеет значительные отличия от принятых в западных странах стандартов. Это не позволяет напрямую использовать ни один из зарубежных стандартов в отечественной практике. В 80-х гг. прошлого столетия в ВНИИГАЗе были начаты работы по созданию отечественных нормативных документов по СПГ [29]. Работа началась из-за появления в СССР повышенного интереса к замещению газом традиционных жидких углеводородных топлив. Первый такой документ назвался «Ведомственные нормы технологического проектирования установок по производству и хранению СПГ, изотермических хранилищ и газозапорных станций» ВНТП-51-1-88 (временные) [28].

Активные работы ООО «Лентрансгаз» совместно с ЗАО «Сигма-Газ» и ЗАО «Крионорд», начавшиеся в 1995-1996 гг. по созданию в Санкт-Петербурге и Ленинградской области комплексов по производству, хранению и использованию СПГ, как и проектирование мини-заводов по производству СПГ на базе АГНКС и ГРС привели к необходимости наличия современной нормативной базы. Заказчик ее разработки по согласованию с



«Газпром» стал Лентрансгаз. Главным разработчиком стандартов на СПГ выступило ЗАО «Крионорд». Его руководство имело многолетний опыт разработки всех основных стандартов на жидкий кислород и водород особой чистоты в виде компонентов топлива. Участниками разработки были назначены первенствующие предприятия страны и самые высококвалифицированные специалисты из газовой и криогенной сферы [30].

В результате на сегодняшний день были разработаны и утверждены следующие нормативные документы:

-ПГ 08-342-00 «Правила безопасности при производстве, хранении и выдаче сжиженного природного газа (СПГ) на газораспределительных станциях магистральных газопроводов (ГРС МГ) и автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях (АГНКС)»;

-ВРД 39-1.10-064-2002 «Оборудование для сжиженного природного газа (СПГ). Общие технологические требования при эксплуатации систем хранения, транспортировке и газификации»;

-СТО Газпром 2-2.3-569-2011 «Методическое руководство по расчету и анализу рисков при эксплуатации объектов производства, хранения и морской транспортировки сжиженного и сжатого природного газа»[31];

-Правила безопасности при проектировании и эксплуатации систем приема, хранения, заправки и газификации СПГ на объектах потребления (в стадии утверждения) [32].

Создание первого в России завода по производству СПГ, который включал в свой состав два резервуара объемом по 100000 м<sup>3</sup> привело к необходимости разработки для таких хранилищ различных специальных технических условий, разработка которых вызвана следующими причинами:

- отсутствие в России нормативной базы по проектированию и сооружению хранилищ для СПГ объемом более 60 тыс. м<sup>3</sup>;
- нераспространенность Ведомственных норм на проектирование установок по хранению СПГ, изотермических резервуаров и газозаправочных станций на резервуары объемом более 60 тыс. м<sup>3</sup>;
- нераспространенность правил безопасности на резервуары сжиженного природного газа объемом более 250 м<sup>3</sup>;
- отсутствие в нормативной базе РФ разделов по расчету хранилищ, которые содержат низкотемпературную жидкость;

Анализируя зарубежные нормативные документы, проектирование резервуаров для хранения сжиженного газа имеет ряд особенностей. Хранилища необходимо оборудовать средствами контроля и противоаварийной защитой для их надежной и безопасной эксплуатации. Внутренняя трубопроводная обвязка необходимо проектировать так, чтобы была возможность осуществлять загрузку газ через верх наружной части резервуара. Сжиженный газ поступает в резервуар через дефлектор, который расположен в крышке хранилища.

Должна быть установлена система по контролю уровня, температуры и плотности жидкости СПГ с автоматической регистрацией в разных точках объема. Система контроля уровня, температуры и плотности позволяет обнаружить и не допустить начало расслоения газа. Также от превышения давления в резервуарах сжиженного газа должна быть предусмотрена трехуровневая система защиты, которая представляет собой последовательное регулирование тремя способами, срабатывающие друг за другом при неэффективной работе предыдущего [33].

## 1.8 Изучение термодинамических свойств метана

Из-за промышленного значения метана, все больше исследователей видят необходимость изучать новые доступные данные теплофизических свойств и по-новому оценить старые данные, чтобы производить больше полезных и точных корреляций. В статье [34] представлено эмпирическое уравнение состояния для метана, основанное на обширном анализе нескольких свойств, а также корреляции для фазовой границы жидкость-пар и для вязкости и теплопроводности метана. Таблицы коэффициентов для этих коррелирующих уравнений и графических представлений функций включены для легкой доступности оценочных значений некоторых свойств. Дискуссии о точности этих корреляций и их применимыми диапазонами, и явные сравнения с экспериментальными данными также приведены. В приложении статьи [34] собрали очень краткие таблицы теплофизические свойства в пределе идеальной или разбавленной газовой, вдоль границы раздела фаз жидкость-пар, и в одной фазовой области. Эта статья представляет собой одну из новой серии Национальный Институт Стандартов и Технологии (NIST) (ранее Национальное бюро стандартов) корреляций на основе критически оцененных данных теплофизических свойств и представлены в стандартном формате с использованием аналогичных функциональные представления. Корреляция для этана, пропана, бутана, и диоксида углерода осуществляются также [34].

В течение последнего десятилетия, после 1976 публикации Международного союза теоретической и прикладной химии (МСТПХ) монографии на метане, были обширные международные экспериментальные исследования свойств метана. Среди них следует отметить те совсем недавние доклады Kleinbrahm, Wagner, и Duschek на поверхности сосуществования и взаимоотношений PVT в критической области метана. Некоторые из старых высокоточных измерений

теплофизических свойств, в том числе некоторые сделали на NIST, остаются полезными.

Теоретические достижения разместили концепцию универсальности критического поведения на твердую основу, и установили определенные неаналитические функциональные поведения с заданными критическими показателями (в том числе поправки к асимптотической теории подобия). Тем не менее, проблема использования этих концепций в определении широких располагающихся инженерных корреляций полностью не решена. В частности, проблема перехода от масштабного уравнения состояния, используемого в критической области к полезным и хорошо понимаемым аналитическим формам, которые широко используются для большинства фазовой диаграмме, остается нерешенной. Кроме того, в теории динамического масштабирования, основой для определения степени любой критической повышения транспортных свойств, как в температуре и плотности, не твердо определены.

В статье [34] было решено сохранить полностью аналитический вид для уравнения состояния. Это позволяет производить простое определение производных свойств и обеспечивает непрерывность всех свойств и их производных на всей фазовой диаграмме.

Существует потребность в повышенной точности уравнения состояния корреляций в критической области, частично основанном на промышленном желании иметь жесткие допуски с присущими им экономическими выгодами и по вновь возможным процессом в почти критических жидкостей. Таким образом, использовали формулу для уравнения состояния, введенное Шмидтом и Вагнером, чтобы приблизить критическую область к свойствам кислорода очень хорошо. Эта форма содержит два типа зависимостей плотностей и, похоже, представляют собой улучшение в критической области метана по сравнению с более привычной Бенедикт Вебб Рубин (БВР)-типа уравнения. Для теплопроводности,

используется неаналитическая форма масштабирования для критического повышения области. Для транспортных свойств, настоящие корреляции представляют явные преимущества по сравнению с ранее опубликованными корреляций NIST. Новые данные NIST 9 дают уверенность в точности наших корреляций. Кроме того, термины разреженного газа использовать теорию Чепмена-Энскога непосредственно для вязкости и с улучшенной обработки внутренних степеней свободы для теплопроводности. Избыточные функции представляются полинома или рациональной полиномиальные приближения и были масштабированы в соответствующих состояний аргумента. Они представляют собой концептуальное улучшение по сравнению функциональными формами. Новая форма уравнения состояния также улучшает корреляции транспорта на не подвижность, поскольку зависит от переменных температуры и плотности.

Соотношения, рассмотренные в статье [34] не были созданы только для первичных инженерных пользователей; они также предназначены, вместе с корреляций для других жидкостей, чтобы позволить тестирование различных аспектов. Таким образом, эти уравнения позволят проводить экспертизу теорий, касающуюся свойств рядов несферических жидкостей, где конформность трудно достичь. Кроме того, есть надежда, что эти корреляции позволяют разрабатывать более приближенные значения для оценки свойств смеси флюидов. Две эти корреляции позволяют одновременно захватить достоверность широких экспериментальных данных и обеспечить систематическую базы уравнений состояния, которые могут быть использованы для разработки прогнозирующих моделей соответственных состояний.

## 2. Моделирование процесса

### 2.1 Физическая модель

В качестве физической модели рассматриваем элементарный объем  $dV = const$ , на который воздействует теплоты  $dQ$ , в результате воздействия которой изменяется внутренняя энергия  $\Delta U$ , которое приводит к изменению термодинамических параметров:  $p$  (давление),  $h$  (энтальпия),  $T$  (температура),  $G$  (энергия Гиббса),  $A$  и т.д.

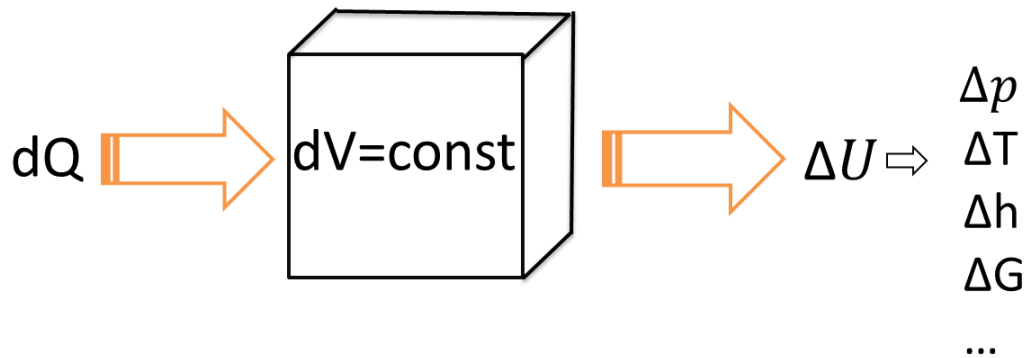


Рисунок 9 – Физическая модель

## 2.2 Математическая модель

Для описания свойств рабочего тела используется решение задачи Коши с начальными условиями, которые задаются первым законом термодинамики для изохорного процесса.

Согласно первому закону термодинамики (закон сохранения энергии) количество теплоты, переданное системе (взятое из системы) равно приращению (уменьшению) внутренней энергии  $dU$  и совершаемой при этом системой элементарной работы  $p dV$  и выражается формулой:

$$\delta Q = \frac{d\rho U}{d\tau} + p dV, \quad (1)$$

где  $\delta Q$  – тепло, энергетический эквивалент тепла;

$p$  – давление;

$V$  – объем системы.

Так как мы принимаем нашу систему изохорной ( $dV = const$ ), поэтому совершаемая системой элементарная работа равна нулю  $p dV = 0$ , а подведенное тепло полностью израсходуется на изменение внутренней энергии. Поэтому уравнение принимает вид:

$$Q = \frac{d\rho U}{d\tau}. \quad (2)$$

Для описания свойств рабочего тела используется уравнение состояния в широком диапазоне параметров. Суть данного подхода состоит в том, что экспериментальные данные по метану, имеющиеся в распоряжении авторов, были аппроксимированы, и аппроксимация была сделана для свободной энергии Гельмгольца, а в качестве аппроксимирующих функций удачно выбраны легко интегрируемые и легко дифференцируемые экспоненциальные функции. Что позволяет достаточно успешно преобразовывать аппроксимационную зависимость для определения всех остальных основных термодинамических параметров метана.

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

$$A(\rho, T) = A^{id} + A^r = RT\varphi = RT(\varphi^{id} + \varphi^r), \quad (3)$$

где  $A$  – молярная энергия Гельмгольца, Дж/моль;

$R$  – газовая постоянная, Дж/(моль·К);

$T$  – температура, К;

$\varphi$  – приведенная энергия Гельмгольца;

$id$  – идеальный газ;

$r$  – реальный газ.

Аппроксимационные зависимости используют безразмерные текущие значения плотности ( $\rho$ ) и температуры ( $T$ ):  $\delta = \rho/\rho_c$  и  $\tau = T_c/T$ . В этом случае аппроксимационные зависимости записываются следующим образом:

$$\varphi^r = \sum_{i=1}^{13} n_i \delta^{r_i} \tau^{s_i} + e^{-\delta^2} \sum_{i=14}^{24} n_i \delta^{r_i} \tau^{s_i} + e^{-\delta^{24}} \sum_{i=25}^{32} n_i \delta^{r_i} \tau^{s_i}, \quad (4)$$

$$\varphi^{id}(\delta\tau) = A^{id} / RT = Q_1 + \ln \delta + Q_2 \ln \tau + Q_3 \tau^{-1/3} + Q_4 \tau^{-2/3} + Q_5 \tau^{-1} + Q_6 \ln(1 - e^{Q_7 \tau}), \quad (5)$$

где  $\delta$  – приведенная плотность;

$\tau$  – приведенная температура;

$\rho_l$  – критическая плотность, моль/м<sup>3</sup>;

$T_c$  – критическая температура, К;

$r_i$  – экспонента от  $\delta$ ;

$s_i$  – экспонента от  $\tau$ ;

$Q_i$  – экспериментальные коэффициенты для идеального газа.

Данный подход был реализован в виде процедуры, алгоритм которой позволяет по входным параметрам плотности и внутренней энергии  $U(\rho, T) = RT(\tau\varphi_\tau^{id} + \tau\varphi_\tau^r)$  определить значения соответствующей температуры  $T$  и далее всех остальных термодинамических параметров:



а) давления:  $p(\rho, T) = \rho RT(1 + \delta\varphi_{\delta}^r)$ ;

б) энтальпии:  $h(\rho, T) = RT(1 + \tau\varphi_{\tau}^{id} + \tau\varphi_{\tau}^r + \delta\varphi_{\delta}^r)$ ;

в) энергии Гиббса:  $G(\rho, T) = RT(1 + \varphi^{id} + \varphi^r + \delta\varphi_{\delta}^r)$ ;

г) энергии Гельмгольца:  $A(\rho, T) = RT(\varphi^{id} + \varphi^r)$ ;

д) энтропии:  $S(\rho, T) = -R(\varphi^{id} + \varphi^r - \tau\varphi_{\tau}^{id} - \tau\varphi_{\tau}^r)$ ;

е) изохорной теплоемкости  $c_v(\rho, T) = -R(\tau^2\varphi_{\tau\tau}^{id} + \tau^2\varphi_{\tau\tau}^r)$ ;

ж) изобарной теплоемкости  $c_p(\rho, T) = c_v(\rho, T) + R \frac{(1 + \delta\varphi_{\delta}^r - \delta\tau\varphi_{\delta\tau}^r)^2}{1 + 2\delta\varphi_{\delta}^r + \delta^2\varphi_{\delta\delta}^r}$ .

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

Студенту:

Группа	ФИО
5Б2Б	Харченко Наталья Игоревна

Институт	Энергетический	Кафедра	теоретической и промышленной теплотехники
Уровень образования	бакалавриат	Направление	«Теплоэнергетика и теплотехника»

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

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

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Экспертная оценка языков программирования
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Составление бюджета НИР
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Анализ критериев ресурсоэффективности

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Календарный план

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Попова Светлана Николаевна	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б2Б	Харченко Наталья Игоревна		

### **3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований. Через такую оценку ученый может найти партнера для дальнейшего проведения научного исследования, коммерциализации результатов такого исследования и открытия бизнеса [35].

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, чтобы удовлетворить потребителя, каков бюджет научного проекта, сколько времени потребуется для выхода на рынок и т.д.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования;
- определение возможных альтернатив проведения научного исследования, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование научно-исследовательской работы;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

### 3.1 SWOT-анализ реализации проекта научного исследования

**Тема:** Моделирование термодинамических параметров в двухфазной области метана в объеме при изохорном нагреве или охлаждении

*Спрос, характер спроса:* Данное исследование возможно использовать для увеличения энергоэффективности, а так же для более точного и быстрого проектирования холодильных установок и рефрижераторов, поэтому потенциальными клиентами являются:

- газодобывающие предприятия;
- предприятия, использующие газ в своем производстве.

*Конкуренты:* отсутствие конкуренции в области моделирования термодинамических параметров в двухфазной области метана.

*Поставщики:* Поставщиками программного обеспечения для написания программ и обработки результатов является корпорация Microsoft.

*Контактная аудитория:* Результаты научного исследования будут полезны тем, у кого возник интерес к исследованиям в области тепломассопереноса в двухфазной среде метана. А также, компании деятельность которых связана с теплоэнергетикой.

*Аудитория влияния:* руководители и сотрудники Томского

*Проектный продукт и его характеристики:* продукт представляет собой программное обеспечение, результатами работы, которой является построение поля различных термодинамических параметров, зависящих от температуры в любой заданный промежуток времени.

*Обеспеченность, потребность в основных средствах:* основными средствами является ЭВМ.

*Оборотный капитал:* оборотный капитал отсутствует

Таблица 2 - SWOT-таблица

<b>«S» - Strengths (СИЛЬНЫЕ СТОРОНЫ)</b>	<b>«W» - Weaknesses (СЛАБЫЕ СТОРОНЫ)</b>
Применение полученных результатов в газовой сфере	Ограниченная целевая аудитория
Применение численного моделирования позволит уменьшить погрешность в разработке оборудования	Перспектива замены оборудования
Получения новых, неопубликованных результатов	
<b>«O» - Opportunities (ВОЗМОЖНОСТИ)</b>	<b>«T» - Threats (УГРОЗЫ)</b>
Опыт моделирования процессов теплопереноса	Появление новых конкурентов
Дополнительные теоретические знания	Нестабильная экономическая ситуация
Освоение новых программ и программного обеспечения	

## **3.2 Сравнительная оценка программных продуктов применяемых в процессе математического моделирования**

Для разработки качественного программного продукта, выбор среды моделирования является одним из важнейших шагов. Именно от этого выбора будет зависеть качество конечного продукта, быстрота работы и т.д. Поэтому произведем сравнительный анализ нескольких сред моделирования.

Формулируется задача: найти аналитическую модель аттестации языка программирования, основывающуюся на его характеристиках.

Модель экспертной оценки строится по следующим параметрам:

1. Качество
2. Гарантия
3. Технологические характеристики
4. Обслуживание
5. Простота проверки ошибок кода

Эксперты оценили характеристики товаров по 10 - ти бальной шкале (10 - max). Далее они оценили важность каждого критерия по 5 бальной шкале (bj). Все данные представлены в таблицах 3 – 5.

*Таблица 3 – Список языка программирования*

№	Язык программирования
1	Delfi
2	C++
3	Pascal
4	Python

Таблица 4 - Оценка конкурентоспособности экспертом №1

Фирма производитель	Простота	Универсаль- ность	Распространенно сть	Технические характеристики	Скорость работы	Сумма
<b>Delphi</b>	7/1,47	7/1,47	8/0,84	9/2,367	7/1,47	7,617
<b>C++</b>	9/1,89	9/1,89	6/0,63	8/2,104	8/1,68	8,194
<b>Pascal</b>	9/1,89	10/2,1	8/0,84	8/2,104	7/1,47	8,404
<b>Python</b>	6/1,26	9/1,89	6/0,63	7/1,841	8/1,68	7,301
<b>Важность (b<sub>i</sub>) [1-5]</b>	4	4	2	5	4	19
<b>Вес (W<sub>i</sub>)</b>	0,21	0,21	0,105	0,263	0,21	-

Для каждого завода изготовителя в столбцах с факторами конкурентоспособности поставлены оценки от 1 до 10, показывающие степень удовлетворения потребностям заказчика.

$b_i$  – важность критерия – в этой строке необходимо было поставить цифру от 1 до 5 (5 – максимальная важность для заказчика).

$W_i$  – весовой коэффициент – в этой строке рассчитан весовой коэффициент каждого фактора конкурентоспособности как отношение важности критерия к сумме важностей всех факторов

Суммарный весовой коэффициент равен единице – значит расчёт произведён верно. Таким образом, весовой коэффициент  $W_i$  показывает долю важности каждого из факторов конкурентоспособности.

Аналогичные оценку провели еще три эксперта. Данные свели в таблице итоговых экспертных оценок - таб.5.



Таблица 5 - Итоговые экспертные оценки

<b>Фирма производител</b>	<b>Эксперт №1</b>	<b>Эксперт №2</b>	<b>Эксперт №3</b>	<b>Эксперт №4</b>	<b>Средняя оценка</b>
<b>Delphi</b>	7,617	8,037	7,722	7,827	7,8
<b>C++</b>	8,194	7,931	8,457	8,457	8,26
<b>Pascal</b>	8,404	8,929	7,879	8,614	8,46
<b>Python</b>	7,301	7,091	6,881	6,986	7,06

В итоге, по результатам четырех независимых экспертных оценок, самый худший результат получила программ Python, а высший средний балл по предоставленным критериям отбора получила среда моделирования Pascal.

### 3.3 Календарный план проведения научного исследования

Для выполнения исследований по данной работе создана рабочая группа, состоящая из руководителя и студента. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Был составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение исполнителей по видам работ. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 8. В таблице 6 представлен календарный план выполнения работ.

Таблица 6 – Перечень работ с количеством необходимых дней

Код работы	Наименование работы	$t_{\min i}$ , день	$t_{\max i}$ , день	У, человек	$t_{\text{ожи}}$ , день
а	Составление и утверждение технического задания	1	1	1	1
б	Оформление технического задания	1	1	1	1
в	Подбор теоретической информации	4	8	1	5
г	Разработка программного обеспечения	3	4	1	5
д	Математическое моделирование	3	5	1	3
е	Проведение вычислений	4	5	1	3
ж	Анализ результатов	3	5	1	4
	Разработка экономической части				
з	SWOT - анализ	1	1	1	1
и	Экспертная оценка	1	1	1	1
к	Календарный план	1	1	1	1
л	Расчет стоимости	1	1	1	1
м	Анализ ресурсоэффективности	1	1	1	1
	Расчет БЖД				
н	Обеспечение пожарной безопасности	1	1	1	1
о	Обеспечение микроклимата рабочего места	1	1	1	1
п	Оформление	3	4	1	3

Таблица 7 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ Раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
	2	Оформление технического задания	Студент
Подбор и исследование ранние проведенных работ	3	Подбор теоретической информации (литература)	Студент
Теоретические исследования	4	Разработка программного обеспечения	Студент
	5	Математическое моделирование	Студент
	6	Проведение вычислений	Студент
	7	Анализ результатов	Руководитель, студент
	8	SWOT - анализ	Студент
Разработка экономической части	9	Экспертная оценка	Студент
	10	Календарный план	Студент
	11	Расчет стоимости	Студент
	12	Анализ ресурсоэффективности	Студент
	13	Обеспечение пожарной безопасности	Студент
Расчет БЖД	14	Обеспечение микроклимата рабочего места	Студент
	15	Оформление	Студент



### 3.4 Смета проекта научного исследования

Так как в данной работе большое внимание уделяется моделированию процессов на персональном компьютере, то материальные затраты не требуют больших вложений, и поэтому можно ограничиться материальными затратами на сумму не более 1000 рублей. В эту сумму входят затраты в основном на канцелярские товары (ручки, карандаши, бумага формата А4).

$$I_{\text{mat}} = 1000 \text{ руб} \quad (7)$$

#### 1. Расчет амортизации основных средств.

Инструментом для проведения исследований является вычислительная техника (персональный компьютер). Данная техника, используемая инженером, теряет свои первоначальные свойства, т.е. амортизируется. Амортизацию персонального компьютера, стоимость которого составляет 30 000 руб., можно посчитать по следующей формуле:

$$I_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.к.т.}}}{T_{\text{кал}}} \cdot Ц_{\text{к.т.}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}} = \frac{70}{365} \cdot 30000 \cdot \frac{1}{7} = 822 \text{ руб.} \quad (8)$$

#### 2. Расчет заработной платы.

Заработная плата – это денежное вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности работы, затрачиваемого времени, качество выполнения работы. Заработная плата складывается из оклада работника, которая зависит от занимаемой должности, и дополнительных коэффициентов. В процессе исследования, помимо инженера, принимает участие научный руководитель, зарплата которого вычисляется исходя из занимаемой им должности и переработок.

- месячный оклад инженеров:

$$ЗП_0 = 14400 \text{ рублей} ; \quad (9)$$

- месячный оклад профессора :

$$ЗП_0 = 27000 + 2500 = 29500 \text{ рублей} . \quad (10)$$

Месячная заработная плата инженера 10 разряда вычисляется по следующей формуле:

$$I_{зн} = ЗП_0 \cdot K_1 \cdot K_2 = 14400 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 20592 \frac{\text{руб}}{\text{мес}} \quad (11)$$

где:  $ЗП_0$  - месячный оклад инженера;

$K_1$  - коэффициент учитывающий отпуск, который составляет 1,1 (10%);

$K_2$  – районный коэффициент по Томской области, который составляет 1,3 (30%).

Фактическая заработная плата инженера за весь период исследований и написания работы вычисляется по следующей формуле:

$$I_{зн}^{\phi} = \frac{I_{зн}}{21} \cdot n = \frac{20592}{21} \cdot 70 = 68640 \text{ руб.} \quad (12)$$

где:  $I_{зн}$  - заработная плата инженера;

$n$  - количество отработанных дней по факту.

Месячная заработная плата научного руководителя, имеющего научную степень профессора, вычисляется следующим образом:

$$I_{зн} = (ЗП_0 \cdot K_1 + Д) \cdot K_2 = (29500 \cdot 1,1 + 2500) \cdot 1,3 = 45435 \frac{\text{руб}}{\text{мес}}, \quad (13)$$

где:  $ЗП_0$  - оклад научного руководителя;

$Д$  – доплата за интенсивность труда.

Фактическая заработная плата научного руководителя:

$$I_{зн}^{\phi} = \frac{I_{зн}}{21} \cdot n = \frac{45435}{21} \cdot 20 = 43271 \text{ руб.} \quad (14)$$

### 3. Фонд заработной платы.

Фонд заработной платы состоит из двух составляющих: годовой заработной платы инженера, годовой заработной платы научного руководителя:

$$\Phi ЗП = ЗП_{имжс} + ЗП_{мр} = 45435 + 43271 = 88706 \text{ руб.} \quad (15)$$

### 4. Социальные отчисления.

Из фонда заработной платы удерживаются 30% на социальное страхование, в пенсионный фонд, на обязательное медицинское страхование:

$$I_{co} = 27\% \cdot \Phi ЗП = 27\% \cdot 88706 = 26612 \text{ руб.} \quad (16)$$

5. Прочие затраты.

В прочие затраты входят отчисления, идущие на налоговые сборы, отчисления в специальные внебюджетные фонды, платежи за предельно допустимые выбросы, вознаграждения за изобретения и инновации, оплата персоналу занимающимся уборкой и охраной, и т.д.

$$\begin{aligned} I_{np} &= 10\% \cdot (I_{mat} + I_{am} + I_{zn} + I_{co}) = \\ &= 10\% \cdot (1000 + 822 + 88706 + 26612) = 11714 \text{ руб.} \end{aligned} \quad (17)$$

6. Накладные расходы.

В накладные расходы входят затраты, связанные с выполнением работы, включая расходы на технологические нужды, командировки, использование электроэнергии, выплату заработной платы и т.д.

$$I_{накл} = 200\% \cdot \Phi ЗП = 2 \cdot 88706 = 177412 \text{ руб.} \quad (18)$$

7. Затраты на проект:

$$\begin{aligned} K_{np} &= I_{mat} + I_{am} + I_{zn} + I_{co} + I_{np} + I_{накл} = \\ &= 1000 + 822 + 88706 + 26612 + 11714 + 177412 = 306266 \text{ руб.} \end{aligned} \quad (19)$$

Таблица 9 – Затраты на проект

Вид затрат	Стоимость, руб.
Материальные затраты	1000
Амортизация основных средств	822
Фонд заработной платы	88706
Социальные отчисления	26612
Прочие затраты	11714
Накладные расходы	177412
Итого	306266