

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(ФГБОУ ВО «АМГУ»)

Факультет: Инженерно-Физический

Кафедра: Стартовые и технические ракетные комплексы

Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зам. Зав. кафедрой

В.В. Соловьёв

« 15. » июня 2021г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Разработка заправочного оборудования природным газом

Исполнитель

студент группы 717-об

 14.06.2021

(подпись, дата)

Катаев М.А.

Руководитель

доцент, канд. техн. наук


 15.06.2021

(подпись, дата)

Соловьёв В. В.

Консультант по БЖД

канд. физ.- мат. наук

 14.06.2021

(подпись, дата)

Аверьянов В.Н.

Нормоконтроль

 14.06.2021

(подпись, дата)

Аревкин М.А.

Благовещенск 2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(ФГБОУ ВО «АМГУ»)

Факультет инженерно-физический  
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы  
Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика

УТВЕРЖДАЮ

Зам. Зав. кафедрой

В.В. Соловьёв

« 26 » апреля 2021г.

**ЗАДАНИЕ**

К выпускной квалификационной работе студента Катаева Максима Александровича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Разработка заправочного оборудования природным газом

(утверждена приказом от 05.04.2021 № 658-уч)

2. Срок сдачи студентом законченного проекта: 15 июня 2021 года

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: Научная литература, периодические задания, отчеты по практикам.

4. Содержание выпускной квалификационной работы: Структура и технические характеристики РН Союз – 7, требования к системам заправки РН и вариантов криогенных систем охлаждения, определение устройства и принцип работы теплообменного оборудования, разработка принципиальной схемы заправочной системы РН; расчеты теплообменного аппарата, чертеж ТОА, 3Д модель теплообменного аппарата и температурная симуляция.

5. Перечень материалов приложения: Цели и задачи бакалаврской работы, принципиальная схема заправочной системы, расчет теплообменного аппарата, чертеж ТОА, распределение сил в симуляции, общий вид в симуляции, результаты теплового расчета, заключение работы.

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе: Аверьянов В.Н.

7. Дата выдачи задания: 26 апреля 2021 года.

Руководитель выпускной квалификационного проекта: Соловьёв Владислав Викторович, доцент, канд. техн. наук

Задание принял к исполнению (дата): 26.04.2021г.

## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 76 с., 40 рисунков, 27 таблиц, 15 источников.

АЗОТНАЯ СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ, КОМПОНЕНТЫ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, МЕТАН, РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА, ТЕПЛООБМЕННЫЙ АППАРАТ, КОЖУХОТРУБЧАТЫЙ ТЕПЛООБМЕННИК, УСТАНОВКА, РАСЧЕТ

Криогенная система предназначена для приема, хранения сжиженного метана (СМ) и заправки им баков горючего (БГ) модификации РН Союз–7 «Амур-СПГ».

Цель работы: Разработка принципиальной схемы системы охлаждения сжиженного метана посредством азота для заправки ракеты-носителя недогретым метаном и создание модели теплообменного аппарата.

В рамках данной работы были сформулированы следующие задачи:

- Проанализировать структуру и технические характеристики ракеты-носителя Союз–7 «Амур-СПГ»;
- Провести анализ существующих систем заправки РН и вариантов криогенных систем охлаждения сжиженного метана;
- Определить необходимые устройства и принципы действия теплообменного оборудования, а так же технологические параметры процесса;
- Разработать принципиальную криогенную схему системы охлаждения СМ с последующей заправкой в РН;
- Выполнить тепловой расчет теплообменного аппарата, определить необходимую поверхность теплообмена и сделать чертеж ТОА;
- Создать 3Д модель теплообменного аппарата и провести проверочную симуляцию для проверки работоспособности.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ РН СОЮЗ-7 «АМУР-СПГ».....	10
2 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЯЗКИ ТОПЛИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ МЕТАН– КИСЛОРОД В ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ .....	12
<b>2.1 Перспективы применения в ЖРД.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 Анализ существующих физико-химических показателей и требований качества СПГ .....</b>	<b>13</b>
<b>2.3 Физико-химические показатели СПГ применяемые для ракетной техники .....</b>	<b>15</b>
3 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СЖИЖЕННОГО МЕТАНА ДЛЯ ХРАНИЕНИЯ И ЗАПРАВКИ РАКЕТЫ- НОСИТЕЛЯ .....	18
4 ВИДЫ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ....	22
5 КОЖУХОТРУБЧАТЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ.....	25
6 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА.....	28
7 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ СЖИЖЕННОГО МЕТАНА В ПРЯМОТОЧНОМ КОЖУХОТРУБЧАТОМ ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ .....	32
8 SOLIDWORKS FLOW SIMULATION МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА ЖИДКОСТИ, ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ. ....	40
<b>8.1 Расчетная область.....</b>	<b>48</b>
<b>8.2 Физические модели .....</b>	<b>49</b>
<b>8.3 Настройки материала .....</b>	<b>50</b>
<b>8.4 Цели .....</b>	<b>55</b>

<b>8.5</b>	<b>Результаты симуляции</b> .....	55
<b>9</b>	<b>БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ РАБОТЕ С МЕТАНОМ</b> .....	64
<b>9.1</b>	<b>Основные положения</b> .....	64
<b>9.2</b>	<b>Техника безопасности и меры предосторожности при работе с вредными веществами</b> .....	64
<b>9.3</b>	<b>Порядок действий при утечке метана</b> .....	65
<b>9.4</b>	<b>Симптомы отравления метаном</b> .....	65
<b>9.5</b>	<b>Первая помощь пострадавшему до приезда медработников</b> .....	66
<b>9.6</b>	<b>Индивидуальные средства защиты</b> .....	66
<b>9.7</b>	<b>Средства коллективной защиты</b> .....	69
<b>10</b>	<b>ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ</b> .....	71
<b>10.1</b>	<b>Выбор материала</b> .....	71
<b>10.2</b>	<b>Расчет массы ГОА</b> .....	71
<b>10.3</b>	<b>Расчет стоимости материала</b> .....	73
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	74
	<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	75

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

БГ — Бак горючего;

БО — Бак окислителя;

ВКС — Воздушно-космическая система;

ЖРД — Жидкостный ракетный двигатель;

КРТ — Компоненты ракетного топлива;

ПДК — Предельно-допустимых концентраций;

РКТ — Ракетно-космическая техника;

РН — Ракета-носитель;

СИЗОД — Средствами индивидуальной защиты органов дыхания;

СМ — Сжиженный метан;

СПГ — Сжиженный природный газ;

ТОА — Теплообменный аппарат.



## ВВЕДЕНИЕ

Применение в ракетных двигателях охлажденных сжиженных компонентов ракетного топлива (КРТ), ниже температуры их кипения, при атмосферном давлении находит все более широкое использование.

Самым экологичным и энергоэффективным компонентом ракетного топлива считается сжиженный водород, так как он имеет самый высокий удельный импульс, а продукт его окисления при сгорании является вода. Помимо этого, в отличие от нефтяных продуктов, производство водорода не зависит от невозобновляемых природных ресурсов.

Например во второй ступени РН «Энергия» в качестве компонента ракетного топлива (КРТ) использовался жидкий водород, который был охлажден до 14,5 К. Такое решение на практике дало существенный положительный результат.

Впрочем в использовании жидкого водорода, в качестве одного из компонентов ракетного топлива (КРТ), имеет и ряд своих определенных эксплуатационных недостатков, таких как:

- Низкая температура кипения (20 К), поэтому для заправки ракеты-носителя (РН) и поддержания ее в состоянии готовности к запуску, требуется решение технически сложных и энергозатратных задач;
- Необходимость использования более вместительных баков, так как у жидкого водорода низкая плотность (для сравнения это в 6,4 раза меньше чем плотность у жидкого метана и в 11,4 раза меньше чем у керосина «РГ-1»);
- Высокая взрыво- и пожароопасность.

Исходя из этого смена топливной связки «кислород-водород», на более выгодную в эксплуатации, парой «кислород-метан» приводит к снижению производственных и эксплуатационных затрат на запуск РН.

В начале 21 века ракетно-космическая промышленность сделала шаги в направлении практического использования в качестве топлива сжиженного природного газа (СПГ), а точнее его основного компонента — метана.

В сравнении с более традиционным керосином, применение метана в качестве одного из КРТ, имеет такие преимущества как:

— Практический удельный импульс, что вследствие дает намного меньшей молекулярной массы исходной молекулы, а соответственно и продуктов горения. За счет его нивелирования из-за меньшей плотности, больше примерно на 3-5%;

— Меньшая массовая доля углерода в молекуле приводит к уменьшению нагара и сажеобразования на стенках камеры сгорания, что в свою очередь увеличивает показатели надёжности и дает возможность многоразового использования систем;

— Лучшее охлаждение частей двигателя, за счет меньшей вязкости и низкой температуры кипения;

— Меньшая смачиваемость топливной системы, а следовательно более полный расход и пониженная загрязнённость топливной системы;

— Температура метана и кислорода достаточно близки (метан ~ 112 К; кислород ~ 90 К), это позволяет хранить их рядом без существенной теплозащиты;

— В случае использования многоразовых ступеней ракета-носителя, более простое очищение полостей двигателя от остатков горючего, для этого достаточно пройти цикл испарения;

— Уменьшение возможности возникновения переохлаждения и критической кавитации вследствие меньшей вязкости;

— Лучшая смешиваемость топливной пары, за счет того, что смешиваются вещества одного в одном агрегатном состоянии;

— Доступность и меньшая стоимость. Производство керосина происходит из определенного сорта нефти, запасы которой уменьшаются значительно быстрее, чем запасы метана;

— Экологическая безопасность, в том числе и при аварийном сливе топлива из РН;



— В случае реализации программ полета на другие планеты Солнечной системы, существуют технологии для получения метана вне Земли.

Из чего можно заключить вывод, что актуальность темы работ посвященных исследованию перспектив использования метана в качестве одного из КРТ в РКТ имеет большую практическую ценность и направлена на повышение эффективности, надежности, экологичности и ресурсопригодности.

Основной проблемой применения метана в качестве компонента ракетного топлива является его эффективное и надежное переохлаждение для хранения и заправки в ракета-носитель. За счет повышения плотности при понижении температуры появляется возможность заправлять большее количество топлива в те же объёмы баков РН.

В дипломной работе рассматривается вариант охлаждения сжиженного метана, проходящего в системе охлаждения теплообменного аппарата, учитывая требования, предъявляемые к теплоносителю такие как: температуру кипения, безопасность использования и стоимость.

## 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ РН СОЮЗ-7 «АМУР-СПГ»

РН Союз-7 — разрабатываемая многоразовая двухступенчатая ракета-носитель среднего класса на метановом двигателе РД-0169. Первая ступень имеет 5 метановых двигателей РД-0169А (одна камера сгорания) с тягой 100 тс. Вторая ступень имеет 1 метановый двигатель РД-0169В-1 (одна камера сгорания) с тягой 95 тс.

РД-0169 — кислородно-метановый ракетный двигатель. Разрабатывается в КБХА. В качестве горючего используется сжиженный природный газ (метан), в качестве окислителя используется жидкий кислород. Предназначен для использования в качестве маршевого двигателя в многоразовых ракетах-носителях. Рабочий процесс в камере сгорания организован по типу «газ-газ». Преимуществами являются: удобство в эксплуатации, экологическая чистота, возможность многоразового использования. Планируется достижение тяги в 200 тонн. В штатном варианте выбрано давление в камере сгорания 175 кгс/см<sup>2</sup>.

Таблица 1 — Основные технические характеристики РН «Союз-7»

Характеристика	Значение
Максимальная стартовая масса, кг	$5,30 \cdot 10^5$
Масса полезного груза (на низкую опорную орбиту), кг	$1,70 \cdot 10^4$
Масса горючего и окислителя, кг	$4,58 \cdot 10^5$
Полная длина, м	$6,19 \cdot 10$
Диаметр корпуса, м	4,10
Количество ступеней	2
Масса горючего (СМ), кг	$1,11 \cdot 10^5$
Масса окислителя жидкий кислород, кг	$3,47 \cdot 10^5$

Таблица 2 — Основные технические характеристики РД-0169А

Характеристика	Значение
Тяга, тс	
- земная	340
- пустотная	390,7
Удельный импульс, кгс·с/кг	
- земной (номинальный)	311,5
- пустотный	358
Диапазон работы, % $R_{кном}$	40-100
Высота, мм	4900
Диаметр сопла, мм	2500
Масса сухого двигателя, кг	3000
Схема	ДВВГ

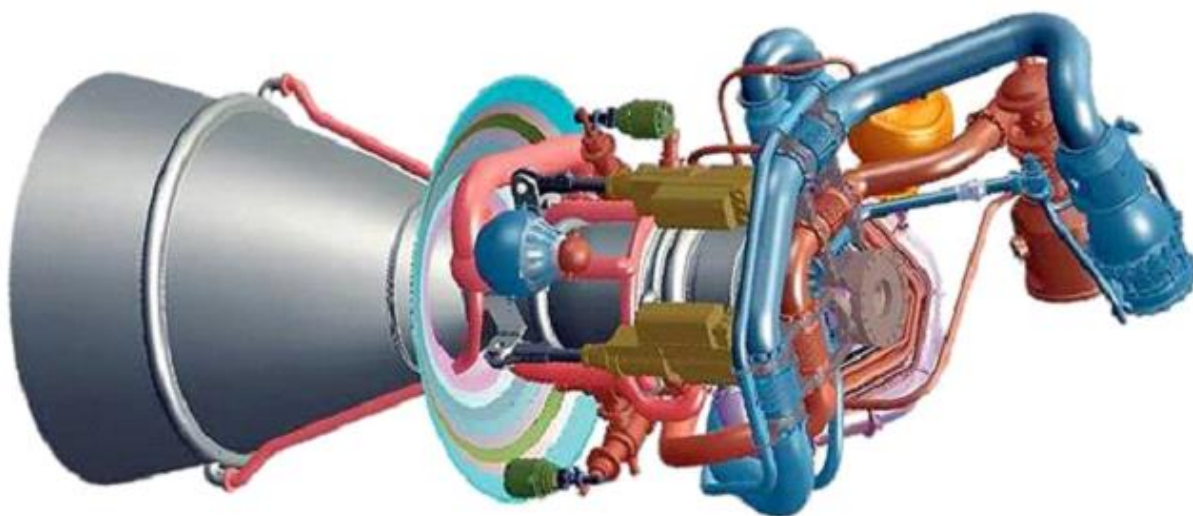


Рисунок 1 — РД-0169А

## 2 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЯЗКИ ТОПЛИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ МЕТАН–КИСЛОРОД В ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

### 2.1 Перспективы применения в ЖРД

Ракетные двигатели уже достигли значительного совершенства и очень высоких, почти предельных рабочих параметров, которые могут быть превышены только с применением новых конструкций, материалов и технологий преобразования энергии. Надежность и экологическая безопасность стали главными показателями качества разрабатываемых двигателей.

Из различных технических решений предпочтение следует отдавать тем, в которых количество потенциально опасных узлов сведено к минимуму, а доля существующих систем, показавших и доказавших высокий уровень надежности на практике, увеличивается с упором на современные материалы и технологии. В настоящее время совершенствование ракетных двигателей направлено на повышение надежности, удельного импульса, снижение удельного веса, снижение стоимости, а также уменьшение или устранение вредного воздействия на окружающую среду.

Использование экологически чистой топливной пары кислород-метан приведет к снижению производственных и эксплуатационных затрат на ракетно-космическую технику, обеспечит конкурентоспособность при запуске полезных нагрузок и оптимизирует эксплуатационные характеристики космодрома Восточный.

В Российской Федерации разработку ЖРД на сжиженном метане ведут ряд организаций такие как: ИЦ имени М. В. Келдыша, НПО «Энергомаш», КБ Химмаш имени А. М. Исаева, ФПГ «Двигатели НК», НИИМаш и КБ Химавтоматики.

Сжиженный природный газ (СПГ) содержит 90% или более метана. По сравнению с керосином, метан имеет более высокую энергетическую ценность и большую охлаждающую способность, а стоимость производства метана ниже, чем керосина. Разработка жидкостных ракетных двигателей на основе

экологически чистого топлива: метана в сочетании с жидким кислородом - часть направлений развития современных ракет-носителей. За счет лучшей охлаждающей способности жидкостный двигатель получает большой запас ресурсов.

Использование сжиженного природного газа (метана) позволяет:

- Обеспечить безопасность окружающей среды даже при аварийном сливе компонентов топлива;
- Повысить удельный импульс тяги и улучшить энерго-массовые характеристики РН;
- Повысить эффективность охлаждения камеры сгорания; – упростить межпусковую обработку топливных трактов;
- Снизить стоимость горючего;
- Обеспечить длительность использования сырьевой базы при наличии больших природных запасов горючего;
- Обеспечить доступность природного газа для любых национальных программ;
- Облегчить создание двигателя любой принципиальной схемы (с окислительным или восстановительным газогенератором);
- Использовать материалы, технологии и оборудование, присущие криогенной технике.

## **2.2 Анализ существующих физико-химических показателей и требований качества СПГ**

На территории Российской Федерации состав и свойства сжиженного природного газа в зависимости от области его применения регламентируются ГОСТ Р 56021-2014 и ТУ 51 03-03-85. Свойства природного газа, газифицируемого из СПГ, должны соответствовать требованиям ГОСТ 5542-87, за исключением требований по интенсивности запаха.

Требования к регазифицированному из СПГ компримированному газу, применяемому в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания транспортных средств (автомобилей, железнодорожного транспорта, речных

судов и сельскохозяйственной техники) регламентирует ГОСТ 27577–2000, который имеет межгосударственный статус. Положения ГОСТ Р 56021–2014 устанавливают показатели качества поставляемого потребителям СПГ следующих марок:

– Марка А – газ горючий природный сжиженный высокой чистоты, обладающий постоянной теплотой сгорания, используемый в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок с узкими пределами регулирования;

– Марка Б – газ горючий природный сжиженный, используемый в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания;

– Марка В – газ горючий природный сжиженный, используемый в качестве топлива для энергетических установок.

При поставках СПГ с массовой концентрацией общей серы не более 0,010 г/м<sup>3</sup> к обозначению марки СПГ добавляют индекс «0». В соответствии с ГОСТ Р 56021–2014 по физико-химическим показателям СПГ должен соответствовать требованиям и нормам, приведенным в таблице 3, из которой видно, что регазифицированный СПГ марки Б удовлетворяет требованиям ГОСТ 27577–2000, регазифицированный СПГ марки В – требованиям ГОСТ 5542–87, за исключением требования к интенсивности запаха. Сжиженный природный газ, имеющий по паспорту марку в соответствии с ГОСТ Р 56021–2014, обладает тенденцией к снижению концентрации легкокипящих компонентов и накоплению тяжелокипящих (в том числе кристаллизующихся) на протяжении всего жизненного цикла, что может привести к переходу СПГ в марку более низкого уровня.

Это связано с особенностями технологических операций, которые проводятся с СПГ на этапах погрузки и разгрузки, транспортировки и хранения. Каждая из вышеперечисленных операций связана с неизбежным испарением части продукта и необходимостью использования части испарившегося сжиженного метана, чтобы снизить давление в резервуарах до регламентных значений. Очевидно, что испарение углеводородных смесей в экстракционном

газе увеличивает содержание низкокипящих компонентов (метан, азот), а их удаление приводит к неизбежной деградации компонентного состава сжиженного метана.

Таблица 3 — Требования к СПГ по ГОСТ Р 56021–2014

Характеристика	Марка		
	А	Б	В
Область значений числа Воббе (высшего) при стандартных условиях, МДж/м <sup>3</sup>	47,2–49,2	Не нормируется	41,2–54,5
Низшая теплота сгорания при стандартных условиях, МДж/м <sup>3</sup>	Не нормируется	31,8–36,8	≥31,8
Молярная доля CH <sub>4</sub> , %	≥99,0	≥80,0	≥75,0
Молярная доля N <sub>2</sub> , %	Не нормируется	≤5,0	≤5,0
Молярная доля CO <sub>2</sub> , %	≤0,005	≤0,015	≤0,030
Молярная доля O <sub>2</sub> , %	≤0,020		
Массовая концентрация H <sub>2</sub> S, г/м <sup>3</sup>	≤0,020		
Массовая концентрация меркаптановой S, г/м <sup>3</sup>	≤0,036		
Расчетное октановое число (по моторному методу)	Не нормируется	≥105	Не нормируется

### 2.3 Физико-химические показатели СПГ применяемые для ракетной техники

Сжиженный природный газ по физико-химическим показателям должен отвечать требованиям в соответствии с техническими условиями «Газ горючий природный сжиженный. Топливо для ракетной техники» или марке А ГОСТ Р 56021-2014 «Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок».



Данные технические требования, приведены в таблице 4. Они соответствуют требованиям существенно более высоким, чем для СПГ, используемого в качестве горючего для других видов транспорта.

Такой метан можно получать путем дополнительной очистки природного газа при его сжижении. На начальной стадии внедрения сжиженного природного газа в РКТ и снабжение им стартовых комплексов может осуществляться от работающих в настоящее время малотоннажных установок для получения СПГ с предварительной подготовкой сырьевого газа.

Таблица 4 — Физико-химические характеристики СПГ для ракетной техники

Характеристика	ГОСТ Р 56021-2014	Характеристика	ТУ 021 00480689-96
Молярная доля метана, %, не менее	99,0	Объемная доля метана, %	96,0±2,0
		Объемная доля этана, пропана, %	2,820±2,0
		Объемная доля бутан-гексана, %	не более 0,036
		Объемная доля непредельных и циклических углеводородов, %	не более 0,001
Молярная доля азота, %, не более	Не норм.	Объемная доля азота, %	не более 1,130

Продолжение таблицы 4

Молярная доля диоксида углерода, %, не более	0, 005	Объемная доля диоксида углерода, %	не более 0,011
Молярная доля кислорода, %, не более	0, 020	Объемная доля кислорода, %	Не норм.
Массовая концентрация сероводорода, г/м <sup>3</sup> , не более	0, 020	Объемная доля сероводорода и серосодержащих (меркаптаны), %	не более 0,001
Массовая концентрация меркаптановой серы, г/м <sup>3</sup> , не более	0, 036		

### 3 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СЖИЖЕННОГО МЕТАНА ДЛЯ ХРАНИЕНИЯ И ЗАПРАВКИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

На основе известных способов, установок и систем для охлаждения криогенных компонентов топлива РН, разработана принципиальная схема системы для охлаждения СМ для заправки РН среднего класса. При моделировании процессов, происходящих при охлаждении СМ жидким азотом в процессе заправки РН, в качестве технических характеристик РН среднего класса использовались характеристики (табл. 1) перспективной российской двухступенчатой РН «Союз-7». Принципиальная схема системы охлаждения СМ жидким азотом представлена на рисунке 2.

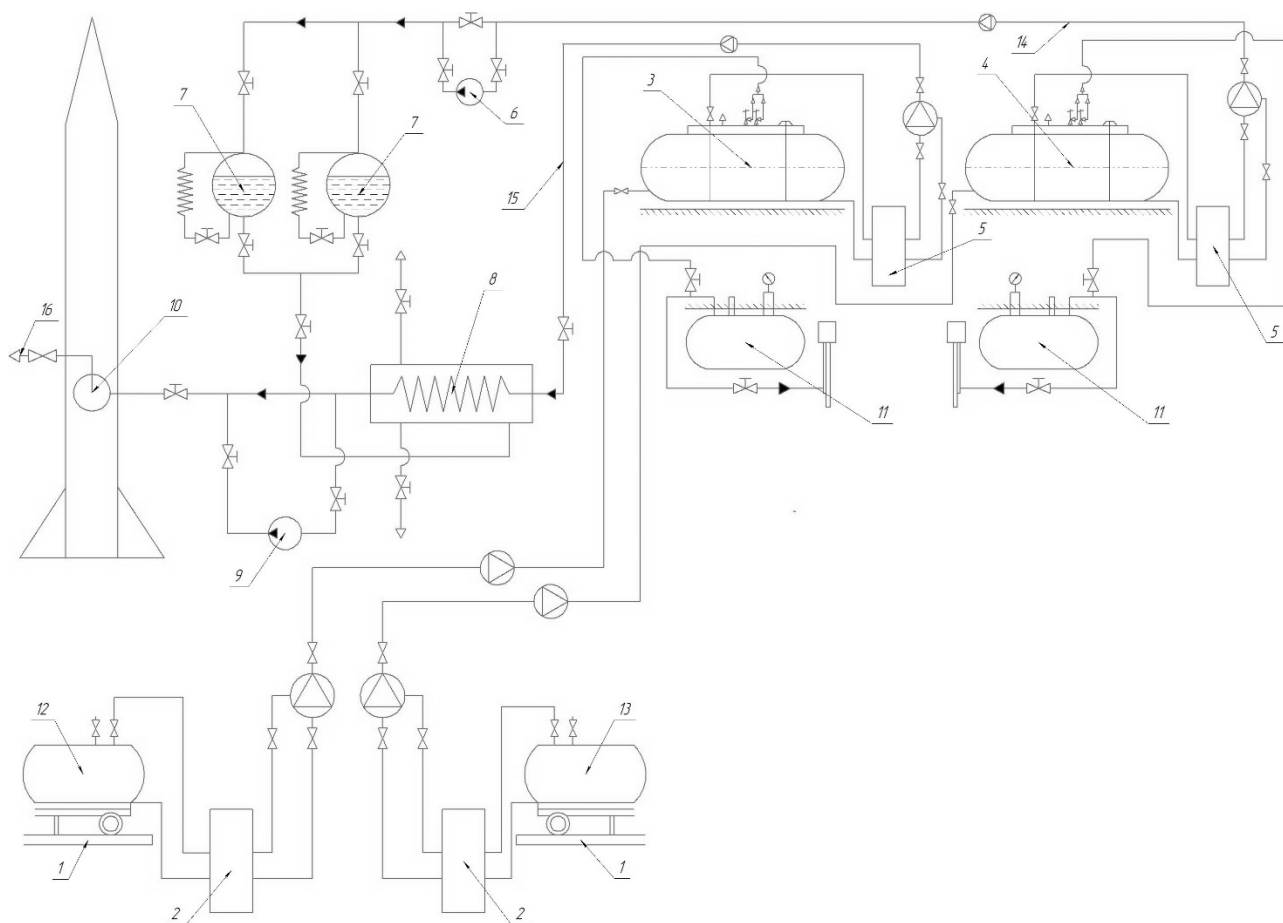


Рисунок 2 — Принципиальная схема системы охлаждения СМ жидким азотом:

- 1 — Железнодорожная эстакада;
- 2 — Оборудование газоразливочной эстакады;
- 3 — Резервуар для хранения сжиженного метана;
- 4 — Резервуар для хранения жидкого азота;
- 5 — Испаритель наддува;
- 6 — Насос азотный;
- 7 — Азотная накопительная ёмкость;
- 8 — Теплообменник-охладитель сжиженного метана;
- 9 — Насос метановый;
- 10 — Бак РН для сжиженного метана;
- 11 — Оборудование пароотводных устройств;
- 12 — Цистерна сжиженного метана;
- 13 — Цистерна жидкого азота;
- 14 — Вход жидкого азота;
- 15 — Вход сжиженного метана;
- 16 — Отвод паров сжиженного метана.

Способ заправки сжиженного метана бака горючего (БГ) ракеты-носителя (РН) воздушно-космической системы (ВКС) относится к авиационно-космической технике. Метод заправки включает в себя заполнение бака горючего (БГ) переохлажденным СМ, который в свою очередь подается в нижнюю часть бака горючего (БГ), с локализацией в полости передней части БГ парогазового, находящегося в динамическом контакте с сжиженным метаном (СМ). Далее идет последующий перелив метана из БГ в дополнительную криогенную емкость, при поддержании в ней избыточного давления, соответствующего штатному давлению БГ в РН.

Подачу переохлажденного сжиженного метана в бака горючего производят до получения значений температуры СМ на выходе из БГ ниже заданной температуры сжиженного метана в БГ перед воздушным стартом РН на выполнение прогрева СМ в БГ до момента десантирования РН. Затем отстыковывают дополнительную криогенную емкость.

На рисунке 2 представлена принципиальная схема системы охлаждения СМ жидким азотом, а так же его хранение и последующая заправка СМ в РН.

Вначале сжиженный метан и азот приезжают в цистернах по железной дороге на стартовый комплекс. Слив происходит на специализированной железно дорожной эстакаде, которая имеет испаритель и по средством вытеснения сливается СМ и азот. На рисунке 3 представлена схема слива сжиженного метана и азота с ж/д цистерн.

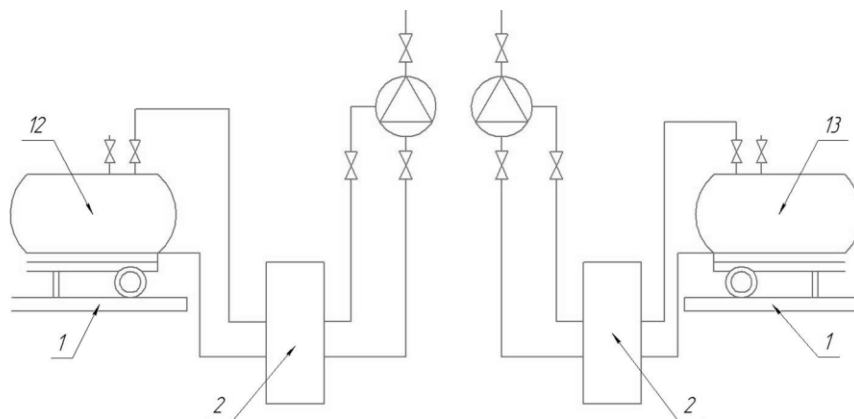


Рисунок 3 — Эстакада для слива СМ и азота

Далее СМ и азот, проходя по магистральным трубопроводам, попадают в резервуары комплекса криогенного хранилища, представленный на рисунке 4. В комплекс криогенного хранилища входит оборудование пароотводных устройств, вакуумирования, регламентных газов, пневмоуправления и контроля параметров.

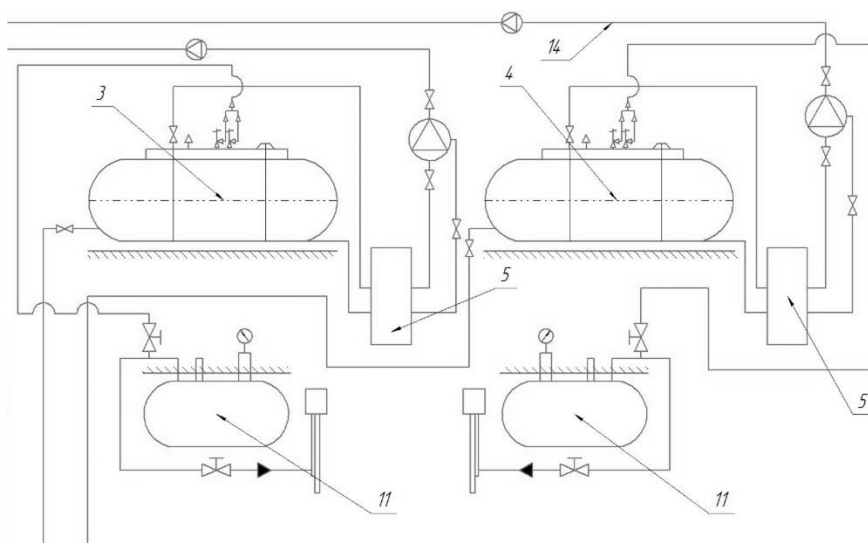


Рисунок 4 — Комплекс криогенного хранилища

На этапе заправки РН по средством испарителей наддува сливаются сжиженный метан и азот из резервуаров хранилища. Затем по трубопроводным магистралям СМ попадает в кожухотрубный теплообменный аппарат, а азот в свою очередь перед попаданием в ТОА, проходит через азотную накопительную емкость для создания необходимого давления. После прохождения теплообменного аппарата сжиженный метан достигает необходимой температуры и плотности для заправки бака горючего в РН. Принципиальная схема охлаждения СМ в теплообменном аппарате и последующая заправка РН представлена на рисунке 5.

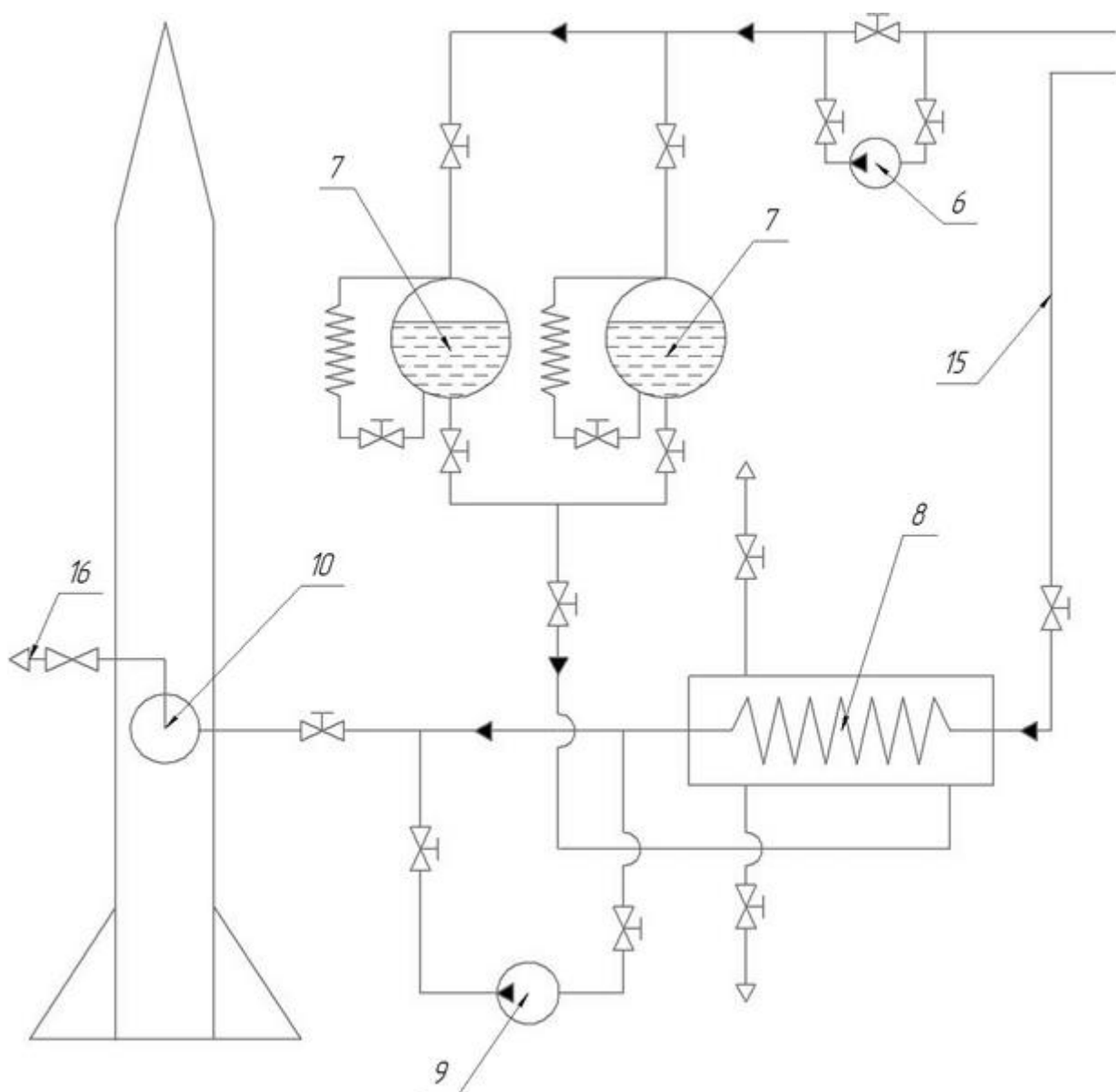


Рисунок 5 — Охлаждение СМ в ТОА и заправка РН

## 4 ВИДЫ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Процессы теплообмена в теплообменных аппаратах осуществляются в различных типах и конструкциях. Так по способу передачи тепла, теплообменные аппараты делят на поверхностные и контактные. В поверхностных теплообменниках рабочие среды обмениваются теплом через стенки из теплопроводного материала, а в контактных аппаратах тепло передается при непосредственном соприкосновении рабочих сред друг с другом.

Классификация теплообменных аппаратов представлена на рисунке 6.

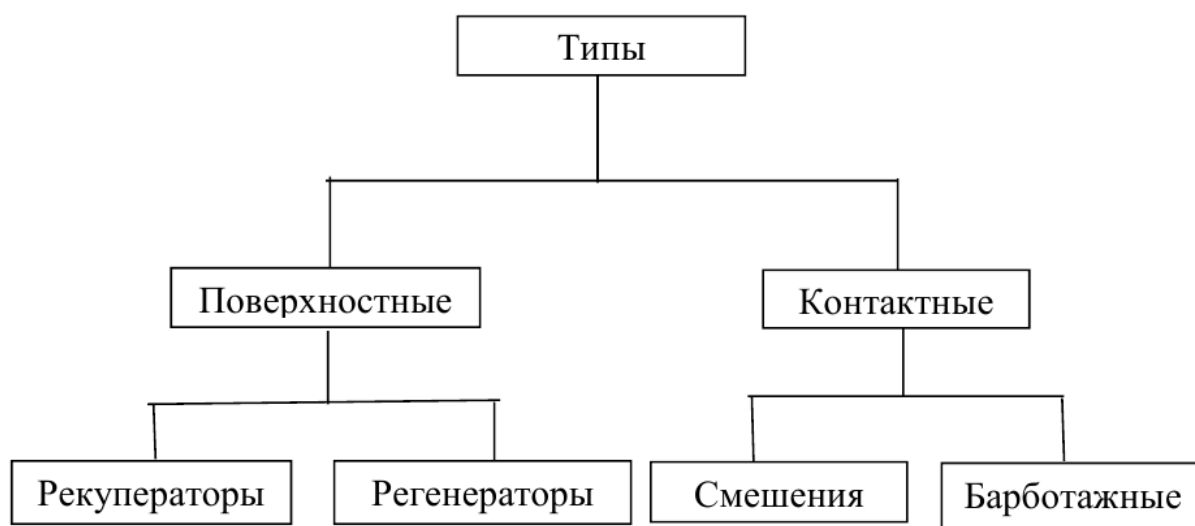


Рисунок 6 – Классификация теплообменных аппаратов

Контактные теплообменные аппараты подразделяются на барботажные и смесительные. В теплообменниках барботажного типа более нагретый теплоноситель прокачивается через массу менее нагретого (или наоборот), не смешиваясь с ним. В теплообменниках смесительного типа нагретые и менее нагретые теплоносители перемешиваются и образуют растворы или смеси. Примером таких аппаратов являются скрубберы различного типа.

В поверхностных теплообменных аппаратах оба теплоносителя омывают разделяющую их твердую стенку, которая таким образом участвует в процессе



теплообмена. Такие аппараты разделяются на рекуперативные и регенеративные.

В регенеративных аппаратах поверхность теплообмена переменнo омываются двумя теплоносителями. В момент нагрева, то есть при протекании горячего теплоносителя, стенки теплообменного аппарата и его набивка в виде шаров, колец и т.д. нагреваются, в них накапливается тепло, которое в свою очередь отдается протекающему вторичному теплоносителю в период охлаждения. В аппаратах периодического действия направление теплового потока в стенках периодически меняется. К таким установкам относятся воздухоподогреватели газотурбинных установок, некоторые типы воздухоподогревателей и тому подобные.

В рекуперативных аппаратах одна поверхность стенки постоянно омывается одним теплоносителем, а другая – вторым. Таким образом тепло от одного теплоносителя передается к другому через разделяющую их стенку из теплопроводного материала.

Также теплообменные аппараты классифицируются по наличию или наоборот отсутствию изменения агрегатного состояния теплоносителей.

Существуют аппараты без изменения агрегатного состояния теплоносителей или с изменением агрегатного состояния только одного теплоносителя. Это может быть конденсация пара первичного теплоносителя или кипения жидкости вторичного теплоносителя, соответственно с изменением агрегатного состояния обоих теплоносителей.

По назначению можно выделить:

1. Подогреватели;
2. Холодильники;
3. Испарители;
4. Конденсаторы;
5. Дистилляторы;
6. Сублиматоры;
7. Плавители и т.п.

По виду взаимного направления потоков теплоносителей относительно друг друга, теплообменные аппараты поверхностного типа классифицируют на четыре основные схемы движения теплоносителей, а также применяются их комбинации:

1. Прямоток – движение двух теплоносителей параллельно друг к другу в одном и том же направлении.
2. Противоток – движение двух теплоносителей параллельно друг к другу в противоположных направлениях.
3. Перекрестный ток – движение двух теплоносителей во взаимно перпендикулярных направлениях.
4. Смешанный ток – один или более теплоносителей делают несколько ходов в аппарате, омывая, при этом, часть поверхности по схеме прямотока, а другую часть – согласно схеме противотока или перекрестного тока.

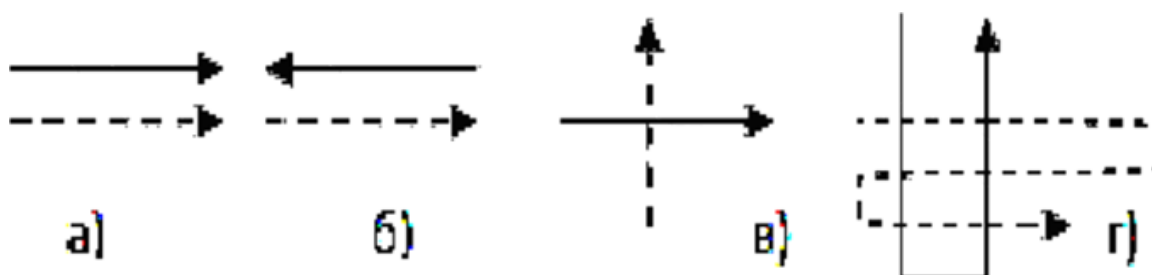


Рисунок 7 – Схемы движения теплоносителей: а) прямоток, б) противоток, в) перекрестный ток, г) смешанный ток

Рекуператоры различаются по конфигурациям поверхности теплообмена на следующие типы: кожухотрубные ТОА, элементные или так называемые секционные ТОА, витые ТОА, оросительные ТОА, ребристые ТОА, спиральные ТОА и пластинчатые ТОА.

## 5 КОЖУХОТРУБЧАТЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

Одним из самых распространенных видов ТОА являются кожухотрубные теплообменники. Их область применения в теплообменных и термохимических процессах с двумя различными жидкостями, парами или газами – как без изменения, так и с изменением их агрегатного состояния.

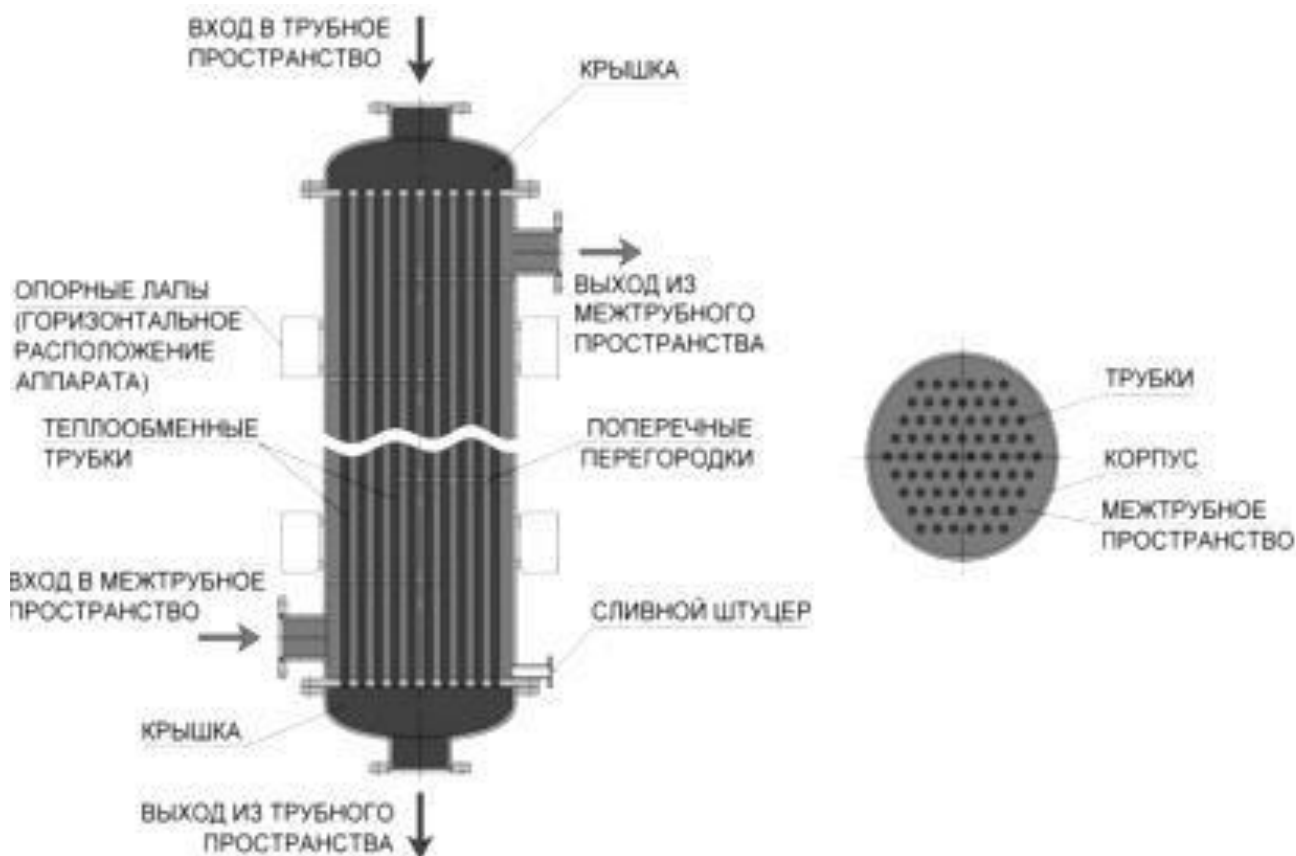


Рисунок 8 – Кожухотрубный теплообменник

К основным элементам кожухотрубного ТОА относятся:

- Пучки труб;
- Трубные решетки;
- Корпус;
- Крышки;
- Патрубки.

В трубных решетках с помощью развальцовки, сварки или пайки крепят концы труб. Далее трубки подгоняются к двум трубным решеткам с использованием сварки или вальцевания. Составляющие пучок трубки, внутри теплообменника, располагаются в шахматном или спиральном порядке, по вершинам равностороннего треугольника. Крышки могут быть съемным элементом конструкции и предназначены для входа и выхода теплоносителя. Трубное и межтрубное пространство внутри ТОА разделяет теплоносители между собой. Так же второй теплоноситель, который находится в межтрубном пространстве имеет входной и выходной штуцеры.

Кожухотрубчатые ТОА могут располагаться как в вертикальном, так и в горизонтальном положении. Основными преимуществами теплообменника данного вида перед другими является самый широкий диапазон применения по рабочим параметрам, низкие требования к чистоте теплоносителей, более высокая стойкость к гидроударам, относительная простота конструкции и дешевизна в производстве и обслуживании.

Однако имеется и ряд недостатков, к ним относится относительно низкий коэффициент теплопередачи и наличие температурных деформаций при больших температурном перепаде.

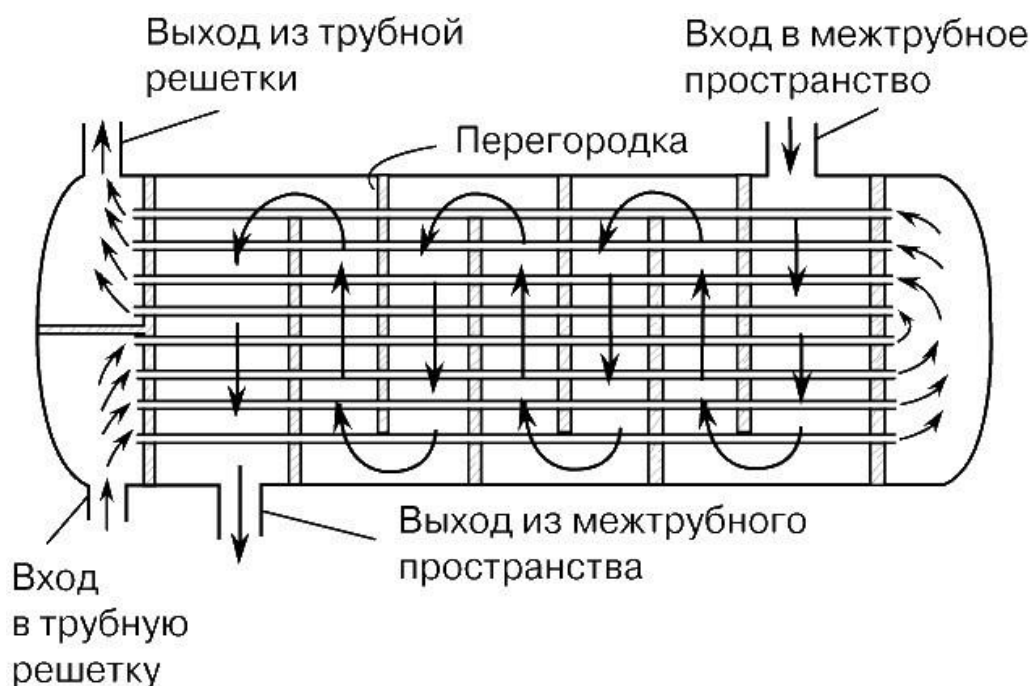


Рисунок 9 – Кожухотрубчатый теплообменник

Принципиальная схема кожухотрубного ТОВА разделяется на два типа работы:

1. Один теплоноситель – сквозь трубный пучок, второй – внутри корпуса, при этом омывая трубы с первым теплоносителем;
2. Два теплоносителя подаются через входные фланцы ТОВА и проходят сквозь весь теплообменник, при этом не смешиваясь.

В процессе работы теплообменника через стенки трубного пучка происходит передача тепловой энергии от одного теплоносителя другому. Однако, нагревание или охлаждение вызывает температурную деформацию стенок корпуса и решетки.

В большинстве своем деформация элементов незначительна, так как учитывается что разница температур небольшая. В случае существенной разницы в температуре возникает механическое напряжение в местах соединения элементов конструкции с различной температурой. Это может привести к повреждению элементов и соединений. Поэтому для подавления этого эффекта применяются некоторые модификации в базовом устройстве кожухотрубчатого ТОВА.

## 6 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

Цель теплового расчета теплообменника является определение габаритно-массовых характеристик, необходимой поверхности теплообмена и подбор стандартизованного теплообменного аппарата в соответствии с ГОСТ Р 53677–2009. «Нефтяная и газовая промышленность. Кожухотрубчатые теплообменники. Технические требования.»

Для достижения цели необходимо выполнить:

- Предварительный тепловой расчет, в рамках которого определить ориентировочную поверхность теплообмена и предварительно подобрать аппарат;
- Провести уточненный тепловой расчет, с целью уточнения требуемой поверхности теплообмена путем расчета коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи с учетом режимов движения потоков в предварительно выбранном аппарате.

Выполним расчет теплообменника для охлаждения сжиженного метана.

Исходные данные представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Исходные данные

Параметр:	Значение:
Расход сжиженного метана	6,3 кг/с
Температура сжиженного метана на входе	-161,15 °С
Температура сжиженного метана на выходе	-180 °С
Давление в аппарате	0,3 Мпа
Допустимая потеря давления	0,1 Мпа
Расход азота	22 кг/с
Плотность сжиженного метана	425 кг/м <sup>3</sup>

Примем для расчета кожухотрубчатый теплообменник с неподвижными трубными решетками и проведем тепловой расчет аппарата при подаче метана в межтрубное пространство при прямоточном движении рабочей среды и теплоносителя.

Тепловой расчет проводят в следующей последовательности:

1. В зависимости от исходных данных предварительно принимают тип аппарата, вариант подачи рабочей среды (в трубное или межтрубное пространство). Принимают теплоноситель или хладагент и его начальную и конечную температуру.

2. Определяют теплофизические свойства рабочей среды – плотность  $\rho$ , вязкость  $\mu$ , удельная теплоемкость  $\lambda$ , теплопроводность  $C_p$  при средней температуре. Среднюю температуру рассчитывают, используя общие формулы.

– Разность температур на концах теплообменника согласно предложенной схеме:  $t_2 / t_1 < 2$ , следовательно средний температурный напор, найдем по формуле:

$$t_{cp} = \frac{(t_1 + t_2)}{2} = -170,5 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (1)$$

где  $t_1$ ,  $t_2$  – начальная и конечная температура рабочей среды.

Если  $\Delta t_{\delta} / \Delta t_{\text{м}} < 2$ , среднюю разность температур можно найти как:

$$\Delta t_{cp} = \frac{(\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\text{м}})}{2} = -175 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (2)$$

где  $\Delta t_{\delta}$  и  $\Delta t_{\text{м}}$  – большая и меньшая разность температур теплоносителей соответственно.

3. Производят предварительный тепловой расчет теплообменника в следующей последовательности.



– Предварительно принимают коэффициент теплопередачи  $K_{op}$  (Вт/м<sup>2</sup>·К)

– Находят тепловой поток  $Q$  в аппарате (Вт), используя формулу

$$Q = G \cdot c \cdot (t_1 + t_2) = 1316370 \text{ Вт}; \quad (3)$$

где  $G$  – массовый расход потока, кг/с;

$c$  – теплоемкость, Дж/(кг·К).

$t_1, t_2$  – начальная и конечная температура рабочей среды, °С.

– Определяют ориентировочную поверхность теплообмена по формуле

$$F = \frac{Q}{K_{op} \cdot \Delta t_{cp}} = 596,23 \text{ м}^2; \quad (4)$$

где  $F$  – площадь теплопередающей поверхности, м<sup>2</sup> ;

$Q$  – тепловой поток в аппарате, Вт;

$K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$\Delta t_{cp}$  – средняя разность температур между теплоносителями, °С.

– Производят предварительный выбор теплообменника, принимая его основные параметры: площадь поверхности теплообмена ( $F$ ), диаметр кожуха ( $D$ ), диаметр труб ( $d_H$ ), длину труб ( $l$ ). При этом поверхность теплообмена аппарата должна быть больше расчетной.

По результатам предварительного расчета, выберем теплообменник с характеристиками представленными в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики ТОО

Характеристика	Значение
$F, \text{ м}^2$	600
$D, \text{ мм}$	733

$d_n$ , мм	10
n	617
l, мм	3050
$D_{вх}$ , мм	450

Примечание: D – диаметры кожуха,  $d_n$  – диаметры труб;  $D_{вх}$  – диаметр входа в ТОА, l – длина труб, n – число труб.

Таким образом выбираем кожухотрубчатый теплообменник с неподвижными трубными решетками, с кожухом диаметром 733 мм, работающий при условном давлении 0.3 МПа, с подачей азота в межтрубное пространство, а метана – в трубное; взаимное направление движения теплоносителей – прямоток, по ГОСТ Р 53677–2009 «Нефтяная и газовая промышленность. Кожухотрубчатые теплообменники. Технические требования».

## 7 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ СЖИЖЕННОГО МЕТАНА В ПРЯМОТОЧНОМ КОЖУХОТРУБЧАТОМ ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ

На основе теплового расчета теплообменника определены габаритно-массовых характеристики, необходимая поверхность теплообмена и найден соответствующий стандартизованный аппарат в соответствии с ГОСТ Р 53677–2009. «Нефтяная и газовая промышленность. Кожухотрубчатые теплообменники. Технические требования.»

Разработка чертежа кожухотрубного теплообменного аппарата для моделирования процесса охлаждения сжиженного метана посредством азота, начинается с построения кожуха по техническим требованиям, представленных в тепловом расчете таблице 6.

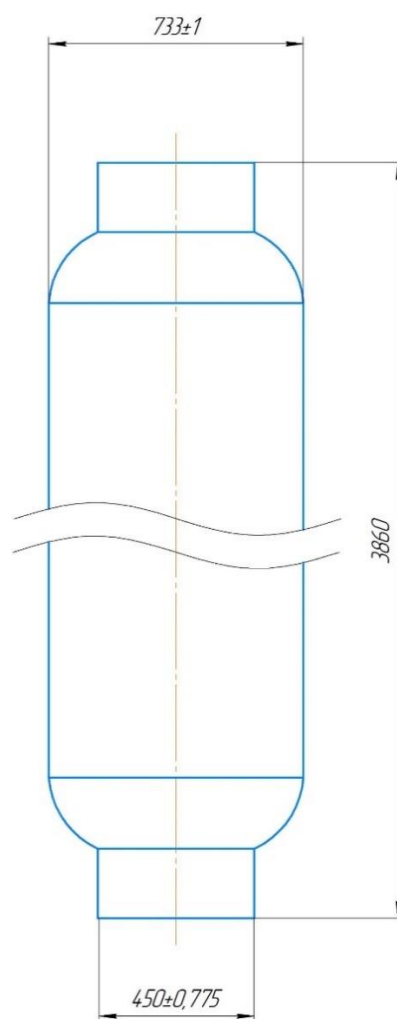


Рисунок 10 — Кожух ТОА

Далее определена установка и система для охлаждения криогенных компонентов топлива с необходимыми изменениями для конкретной задачи, представленных в тепловом расчете таблице 7.

Таблица 7 — Основные конструктивные параметры ТОА

Конструктивный параметр	Значение
Тип аппарата	прямоточный
Число потоков	2
Число труб	617
Поток в межтрубном пространстве	холодный
Труба	гладкая
Материал труб	нерж. ст. 12Х18Н10Т
Наружный диаметр труб, мм	10
Внутренний диаметр труб, мм	8
Наружный диаметр обечайки, мм	733
Внутренний диаметр обечайки, мм	725
Длина труб	3050
Диаметр входа метана в межтрубное пространство	450
Диаметр выхода охлажденного метана	450
Диаметр входа азота	180
Диаметр выхода азота	180

После построения кожуха теплообменного аппарата, выбраны габаритные размеры входа и выхода хладагента в межтрубное пространство, а так же их количества. Для создания турбулентного движения азота в межтрубном пространстве принято решение использовать один вход в ТОА, а для быстрого

отвода отработанного азота использовать несколько выходов. Диаметры входа и выходов азота в межтрубное пространство представлены в таблице 7.

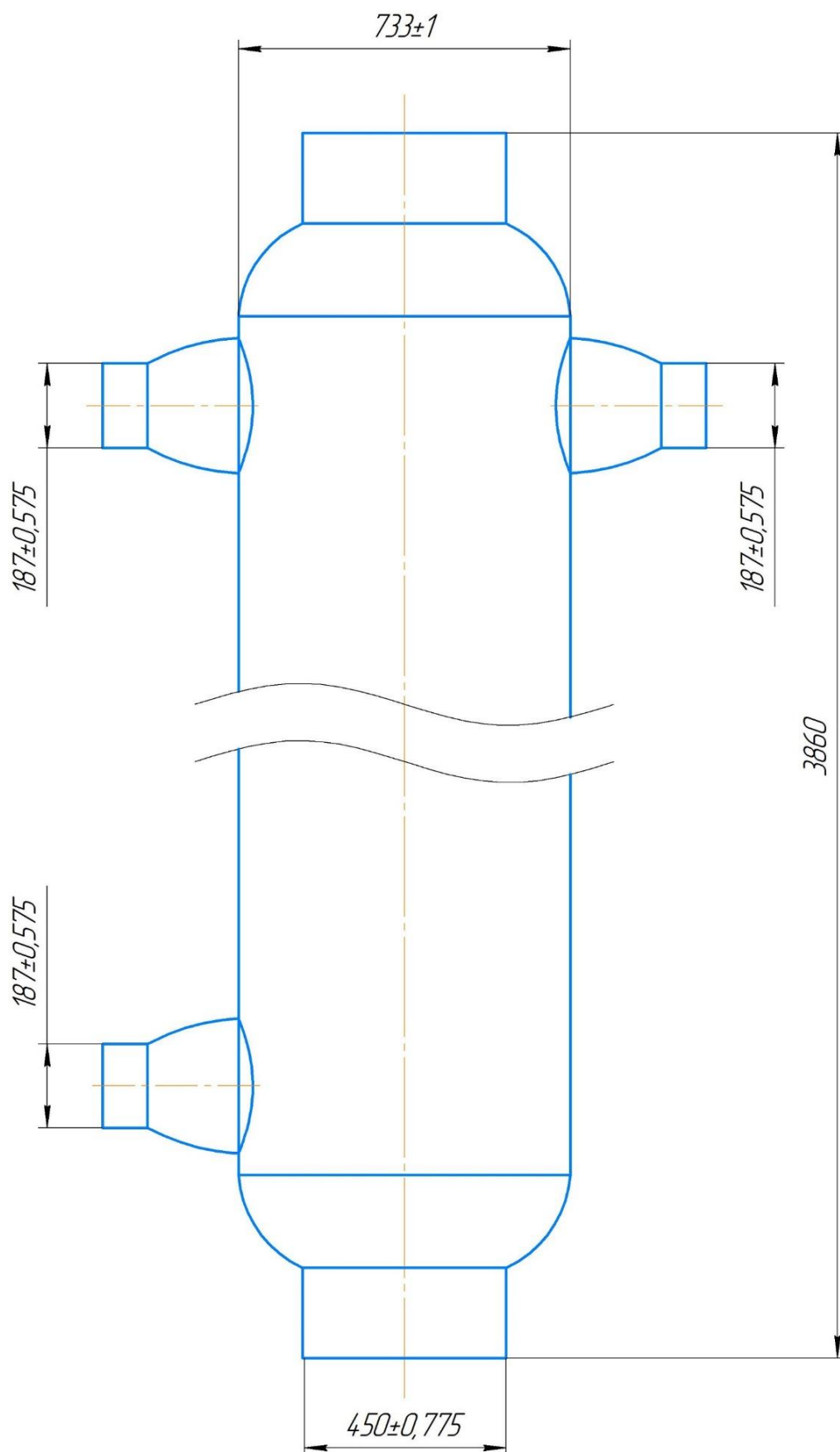


Рисунок 11 — Кожух ТОА со входом и выходами

Следующим этапом идет создание межтрубного пространства в ТОА. Она состоит из внутренней сетки в количестве 617 труб диаметром 10 мм и длиной 3050 мм. Внешний диаметр кожуха составляет 733 мм, а внутренний 725 мм.

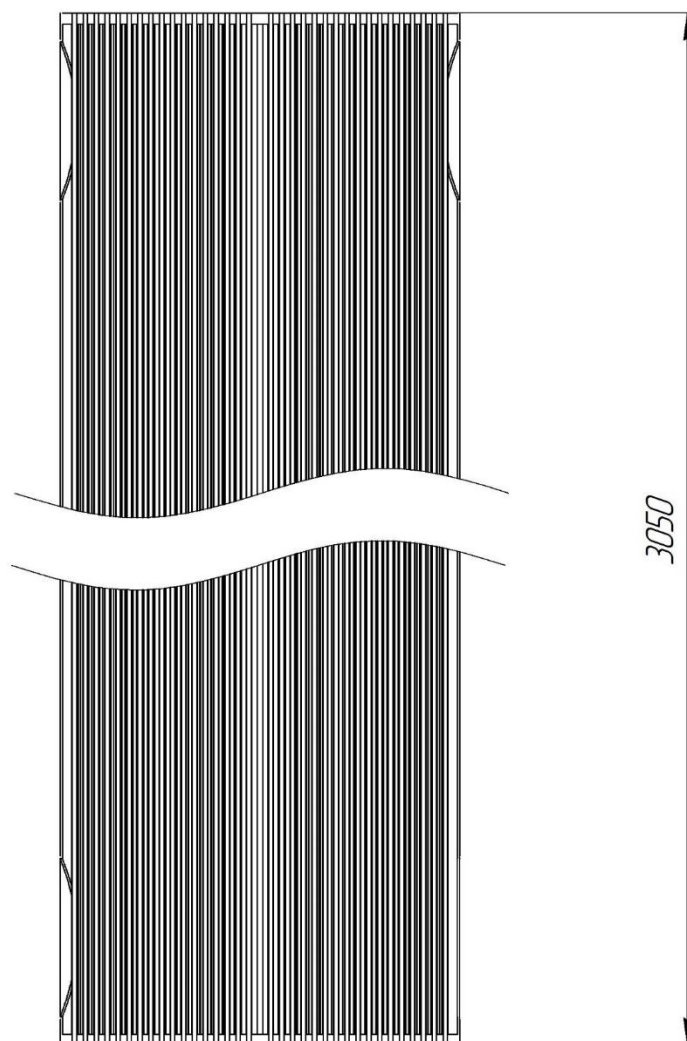
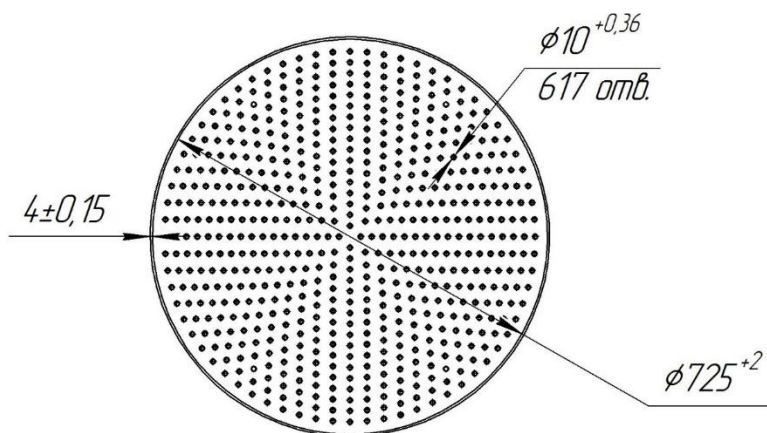


Рисунок 12 — Межтрубное пространство ТОА

Заключительный этап создания чертежа со всеми размерами сечениями и вырезами. Готовый чертеж представлен на рисунке 13.

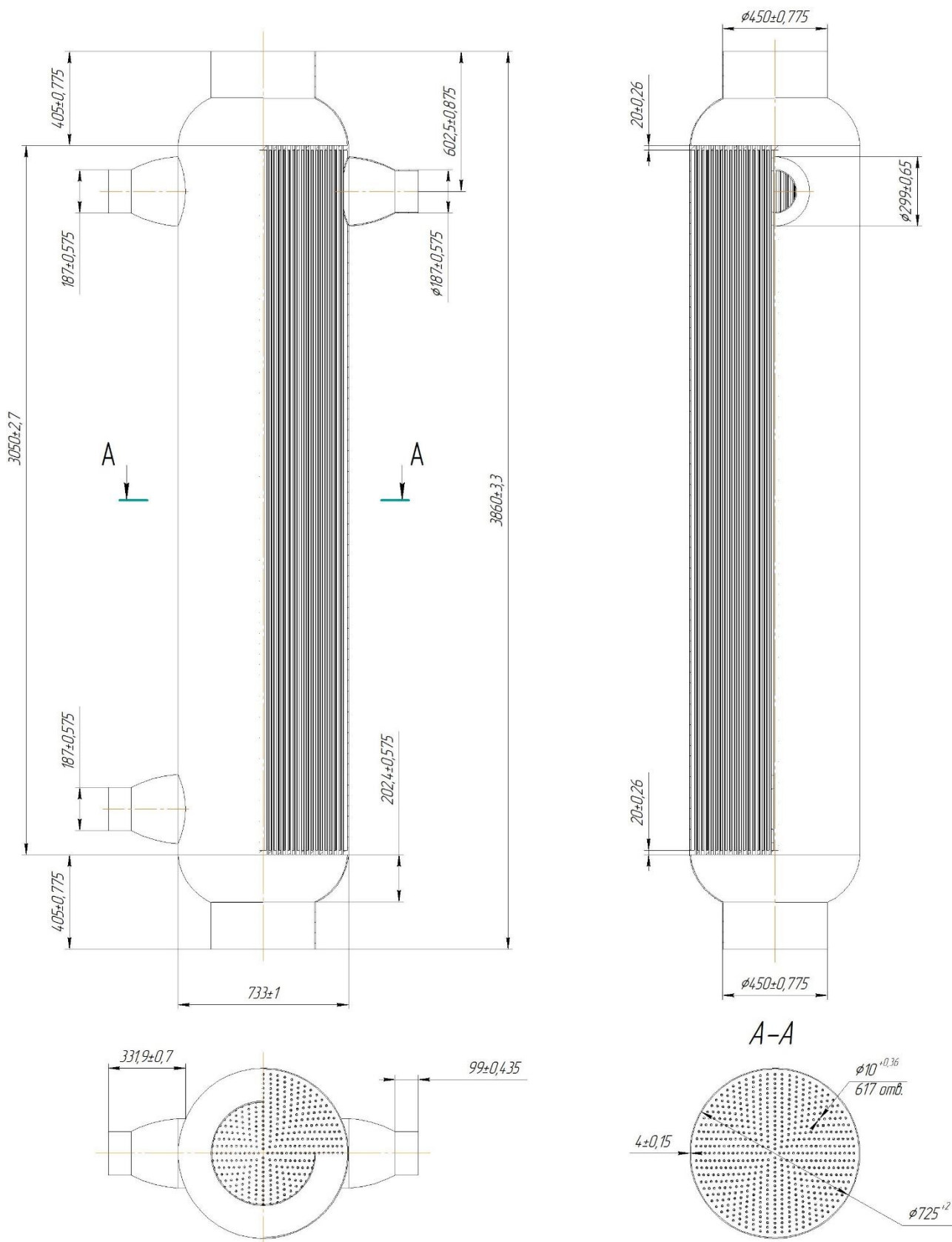


Рисунок 13 — Прямоточный трубчатый ТОА в разрезе

Далее из разработанного чертежа, в SolidWorks построена компьютерная 3Д модель прямооточного кожухотрубного теплообменного аппарата для дальнейшего использования в симуляции SolidWorks FlowSimulation. Для этого необходимы входные данные, которые представлены в таблицах 7 – 10.

Компьютерная модель ТОА представлена на рисунке 14.

Таблица 8 — Основные параметры потоков

Вещество	Метан (CH <sub>4</sub> )	Азот (N <sub>2</sub> )
Расположение потока	межтрубное	трубное
Тип потока	теплый	холодный
Температура потока, К		
Вход	112	93,89
Выход	78	89,71
Давление, Мпа		
Вход	0,3	0,3
Выход	0,2	0,2
Число труб	617	0
Расход, кг/с	6,3	22

Таблица 9 — Параметры, управляющие процессом моделирования

Параметр	Значение
Относительный теплоприток, %	0
Коэффициент запаса, %	15
Шаг выдачи результатов расчета (координата по высоте намотки от входа трубных потоков), м	0,1
Шаг интегрирования, м	0,01



Таблица 10 — Основные режимные параметры прямоточного трубчатого ТОА

Параметр	СМ (CH <sub>4</sub> )	Азот (N <sub>2</sub> )
Расход газа, кг/сек	22,00	6,30
Тепловая нагрузка по потокам, кВт	1316,37	1316,37
Температура потока (вход), К	112,00	78,00
Температура потока (выход), К	93,89	89,71
Гидр. сопротивление, кПа	21,95	57,96



Рисунок 14 – Компьютерная модель ТОА

Составным элементом конструкции кожухотрубного теплообменника является пучок труб, который размещен в собственной камере и закрепленный на трубной решётке. В количестве 617 труб внешним диаметром 10 мм и толщиной стенки 1 мм. Компьютерная модель ТОА в разрезе представлена на рисунке 15.

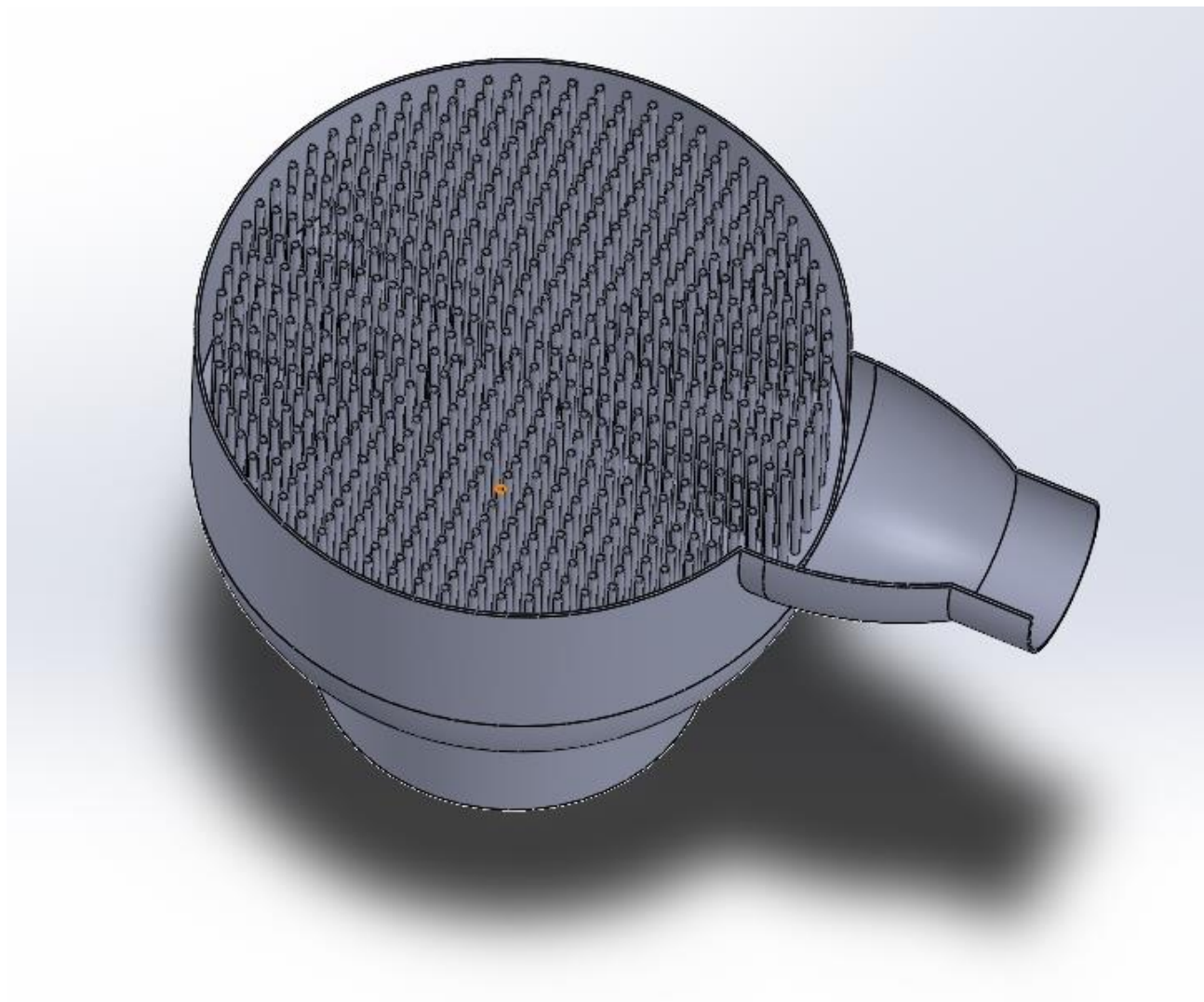


Рисунок 15 – Компьютерная модель ТОА в разрезе

## 8 SOLIDWORKS FLOW SIMULATION МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА ЖИДКОСТИ, ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ.

Для более полной оценки процессов, происходящих в кожухотрубном теплообменном аппарате при охлаждении азотом СМ, проходящего по трубам, необходимо провести моделирование процесса охлаждения СМ в ТОА. Моделирование проводилось Solidworks Flow Simulation. Основные исходные данные представлены в таблицах 7–10.

Начинаем расчет с запуска мастера проекта.

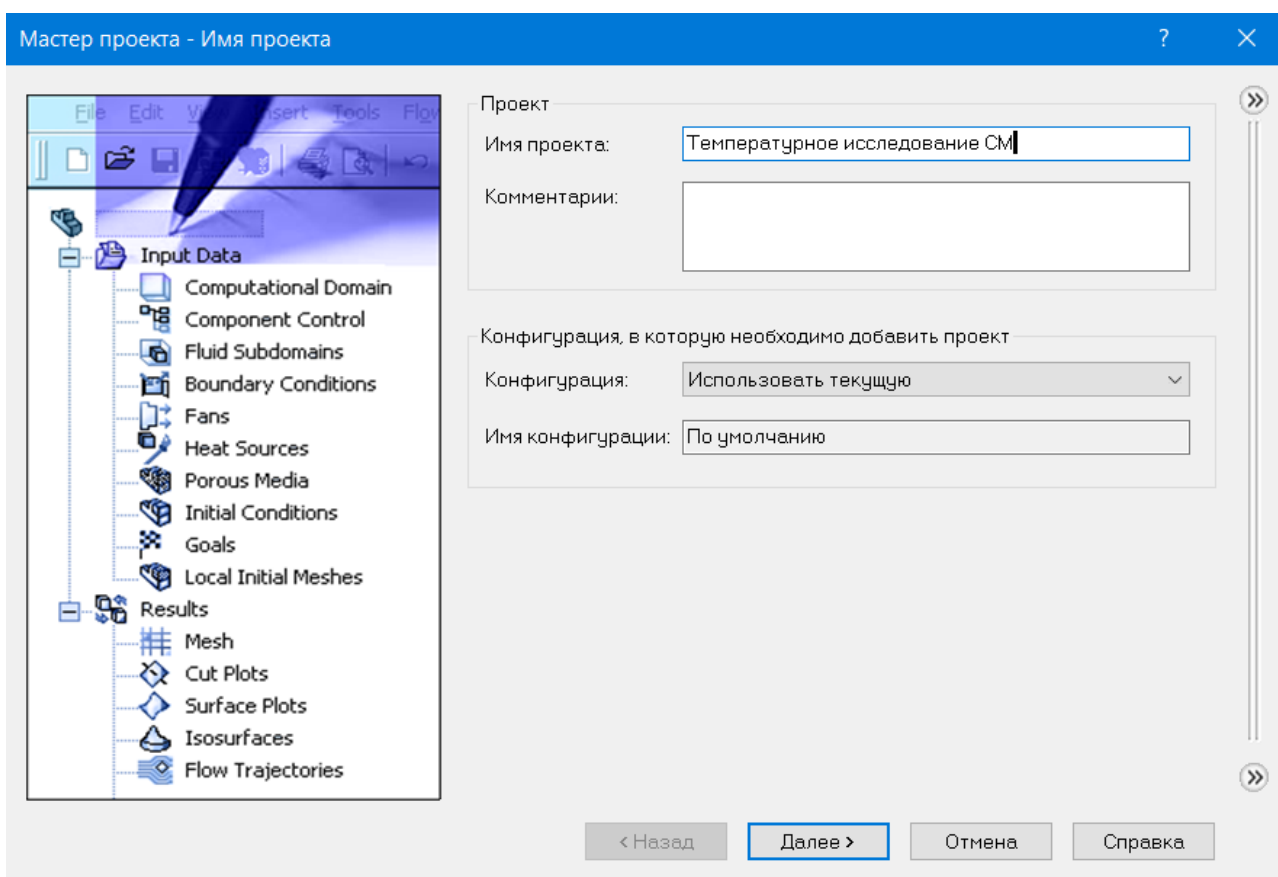


Рисунок 16 – Мастер проекта

Меняем системные единицы на которые нам удобно использовать. Температуру измеряем в К, объемный расход жидкости в м<sup>3</sup>/с, массовый расход в кг/с.

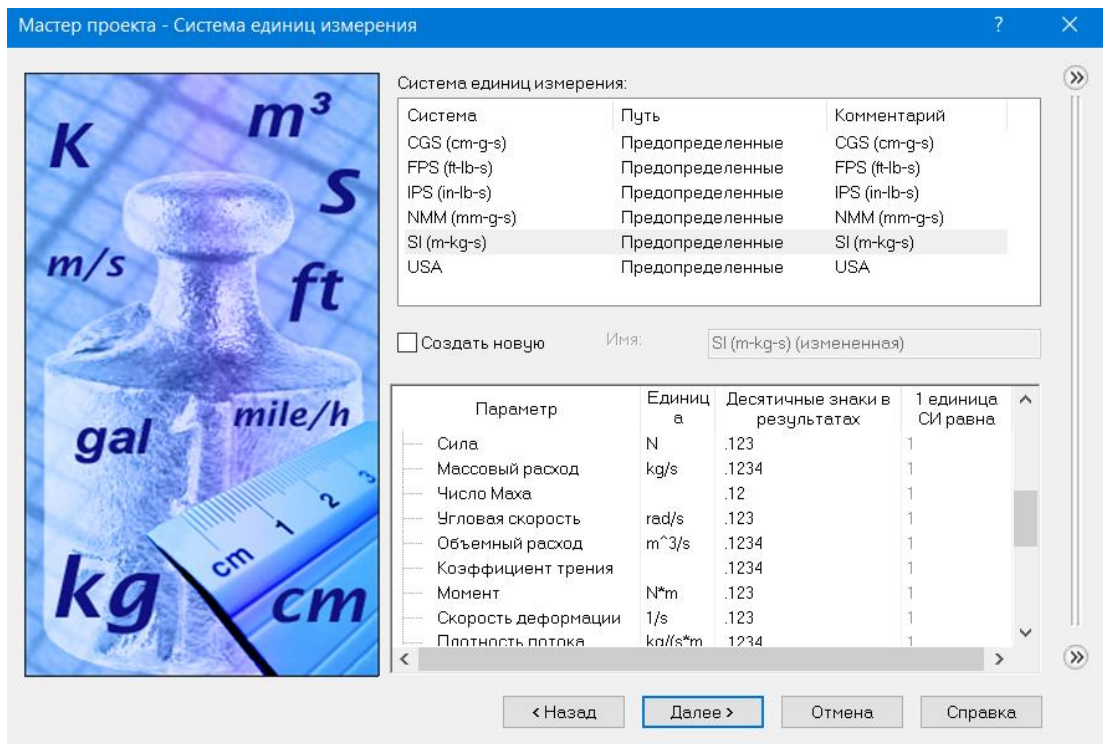


Рисунок 17 – Система единиц измерения

Далее включаем теплопроводность в твердых телах и гравитацию по оси Y.

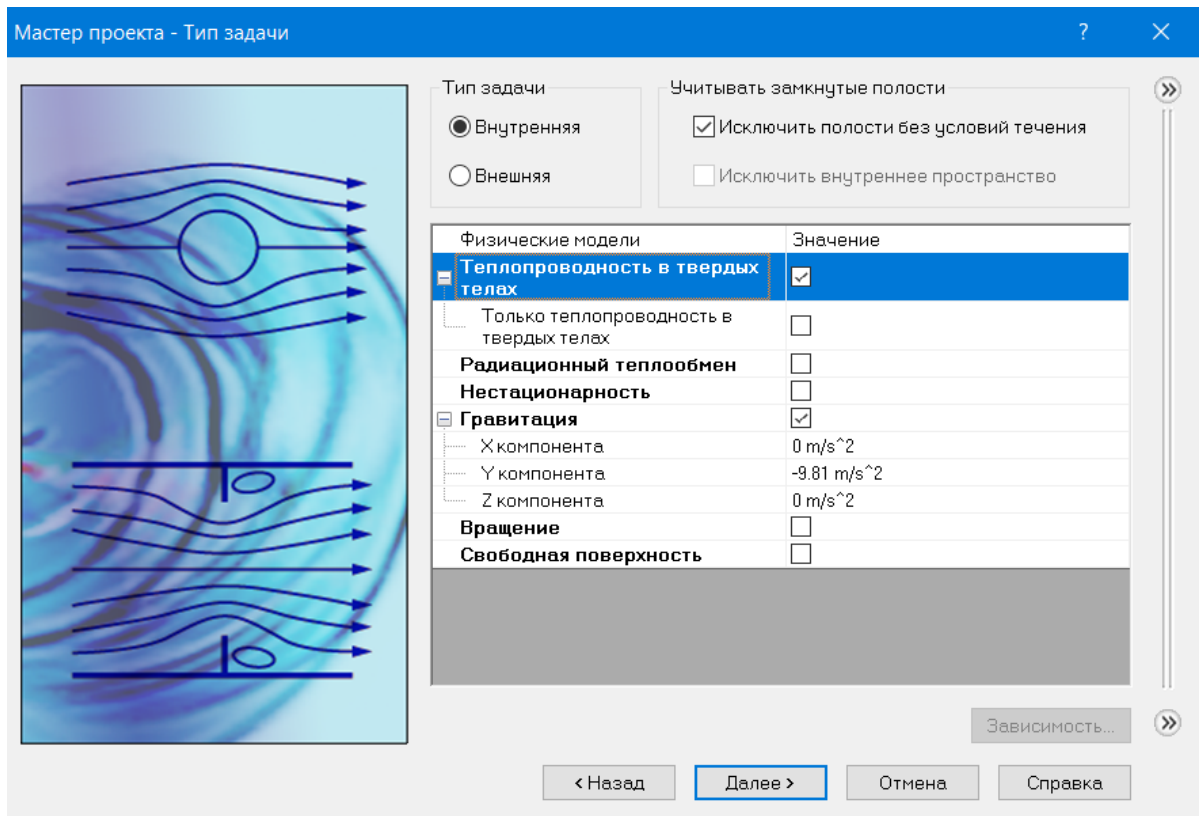


Рисунок 18 – Тип задачи

В параметрах текучей среды выбираем Methane и Nitrogen. В качестве среды по умолчанию будет метан.

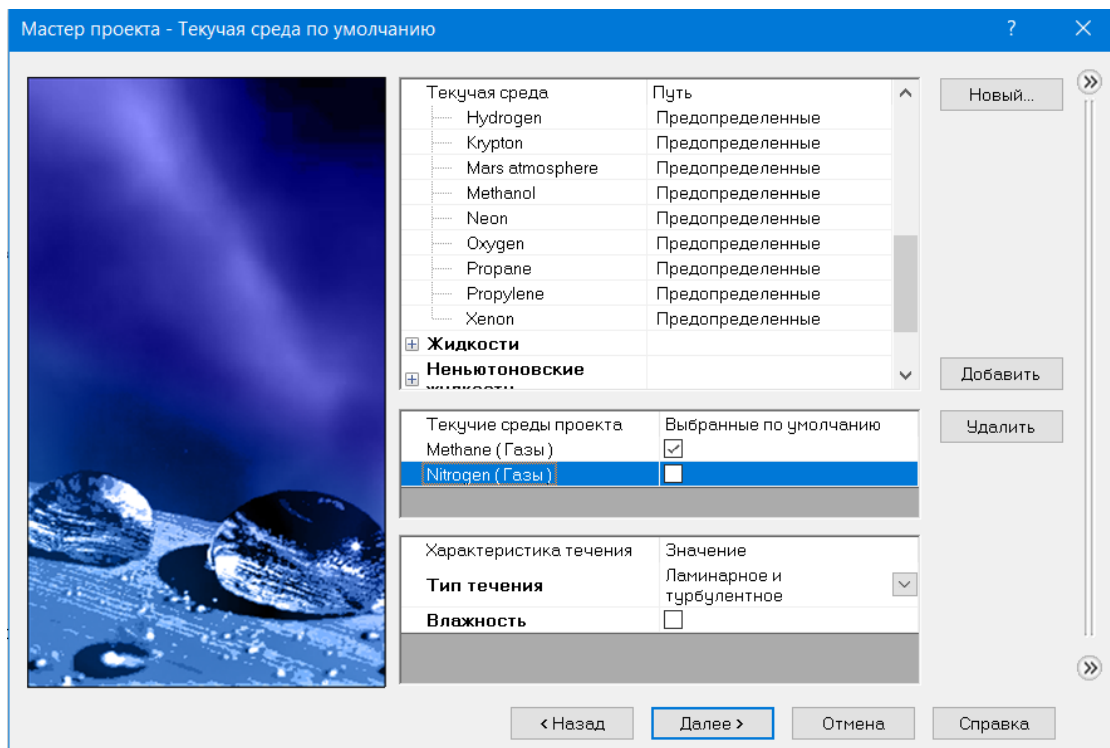


Рисунок 19 – Текучая среда

Для материала кожуха и труб выбираем сталь.

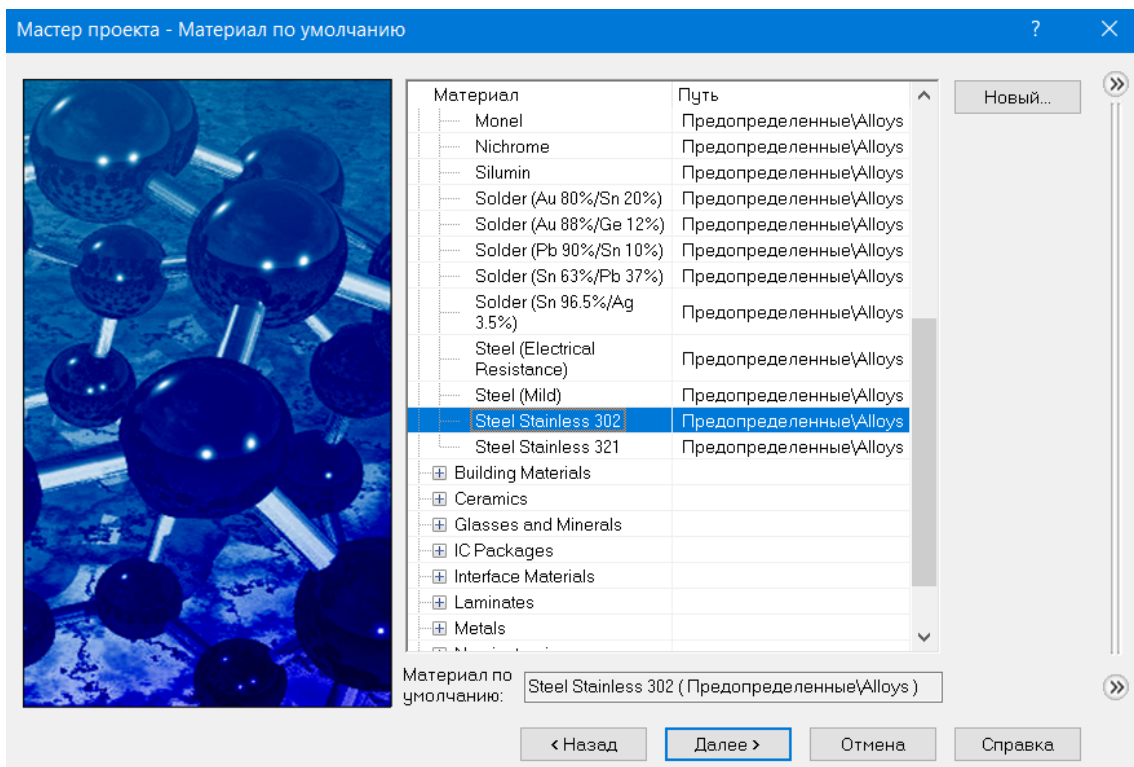


Рисунок 20 – Материал



Тепловое условие на внешних стенках остаётся по умолчанию:  
Адиабатическое.

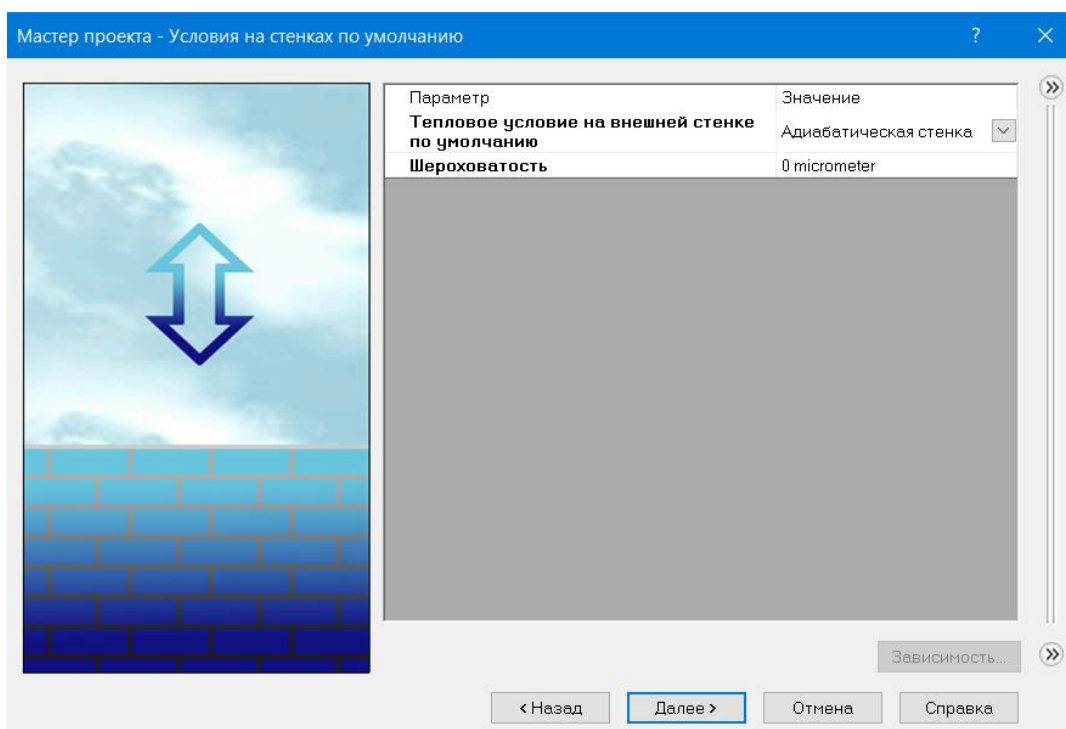


Рисунок 21 – Условия на стенках

Выставляем температуру окружающей среды 293 К и давление в ТОА 300000 Pa.

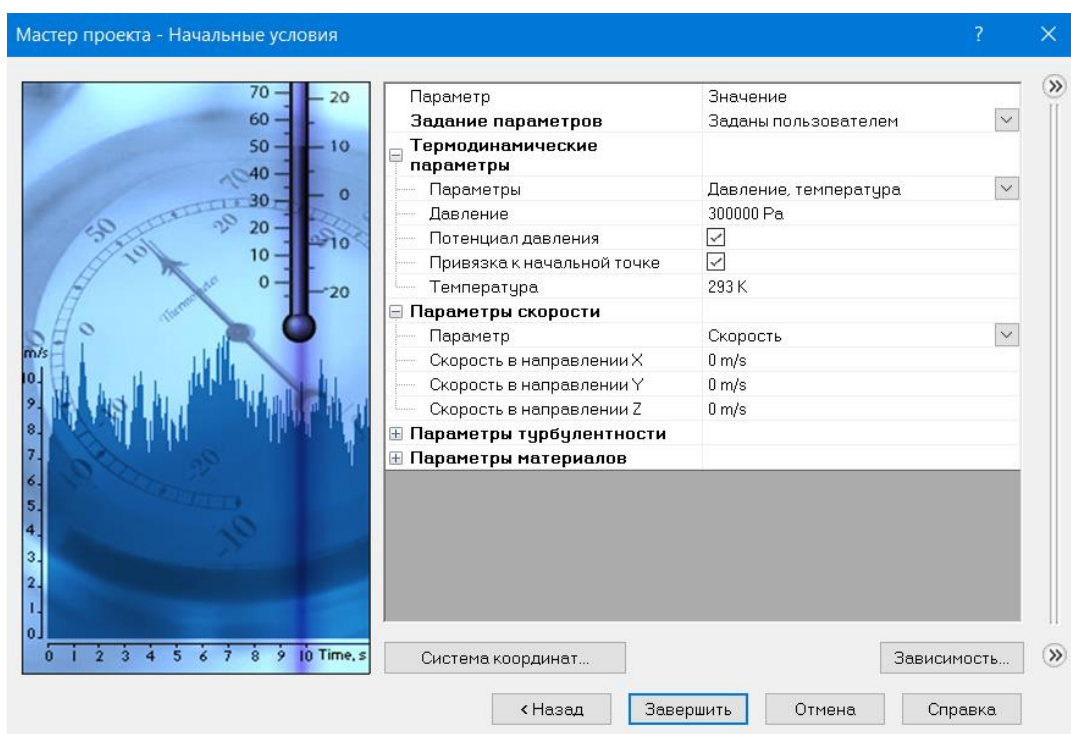


Рисунок 22 – Нормальные условия

Создаем новую подобласть течения метана и азота. Для метана устанавливаем термодинамические параметры на входе  $T=112\text{ K}$ ,  $P=300000\text{ Pa}$ .

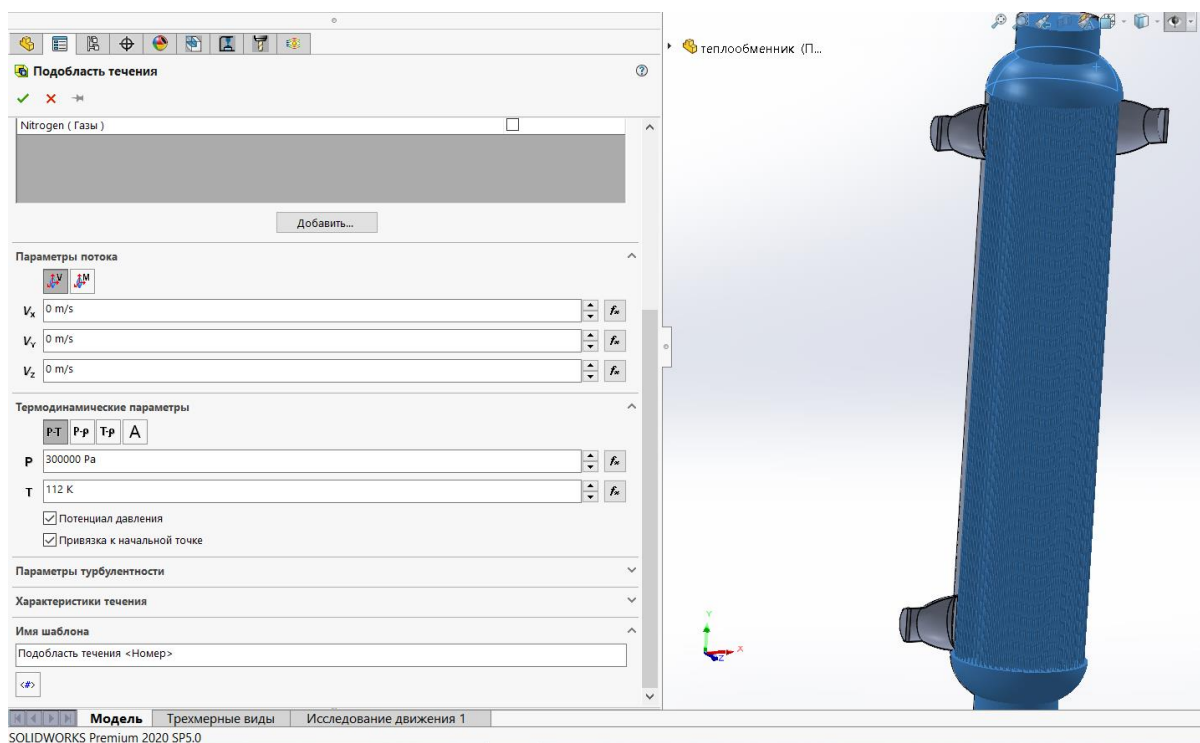


Рисунок 23 – Подобласть течения метана

Для азота устанавливаем термодинамические параметры на входе  $T=78\text{ K}$ ,  $P=300000\text{ Pa}$ .

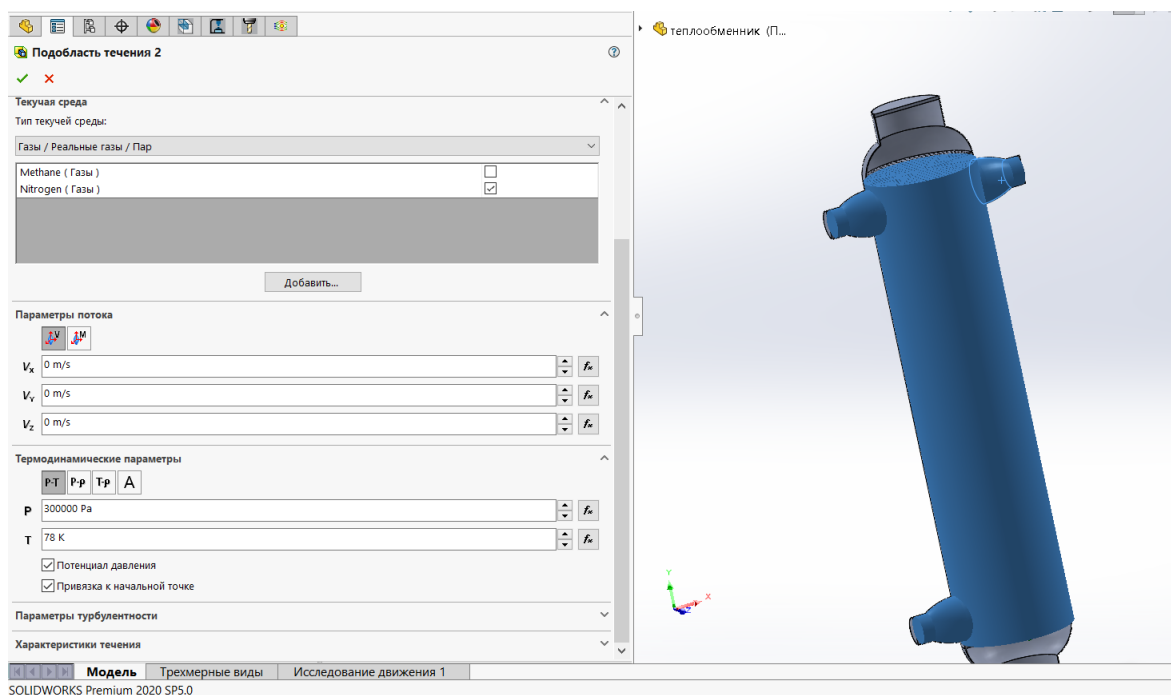


Рисунок 24 – Подобласть течения азота

Далее задаем граничные условия. Массовый расход метана на входе 6,3 кг/с.

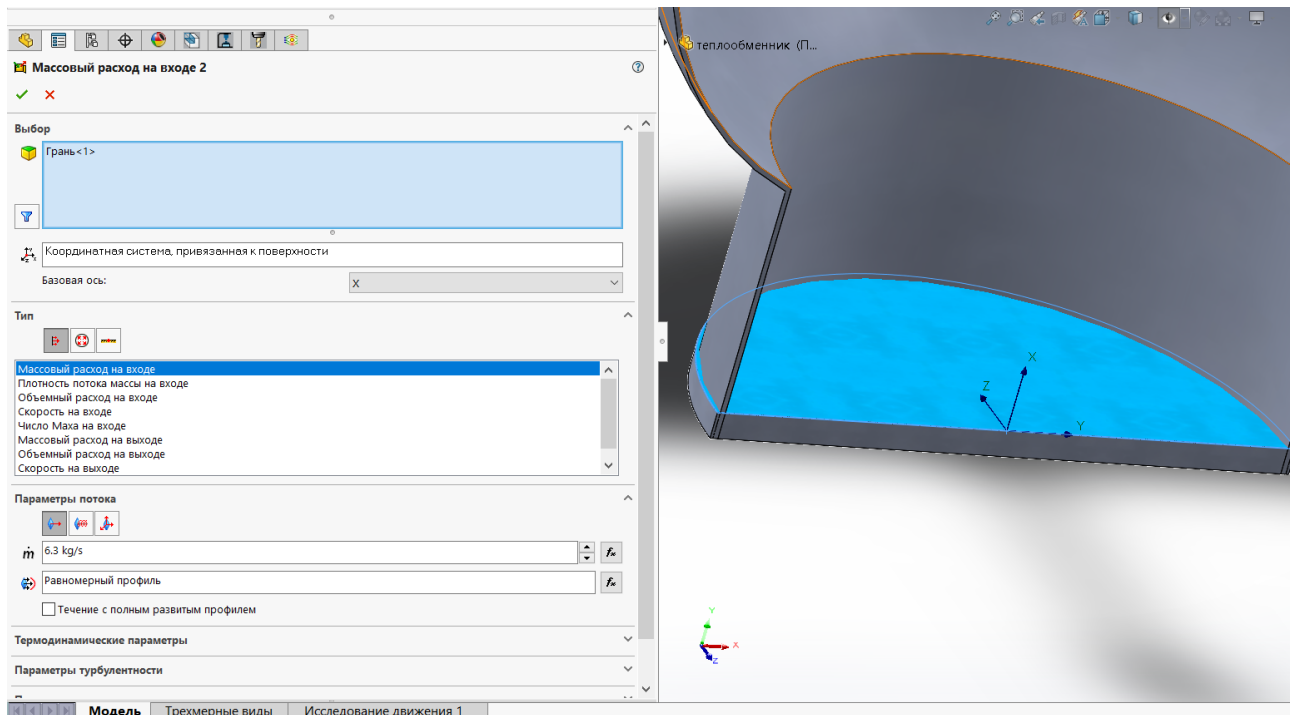


Рисунок 25 – Массовый расход метана

Задаем массовый расход азота на входе 22 кг/с.

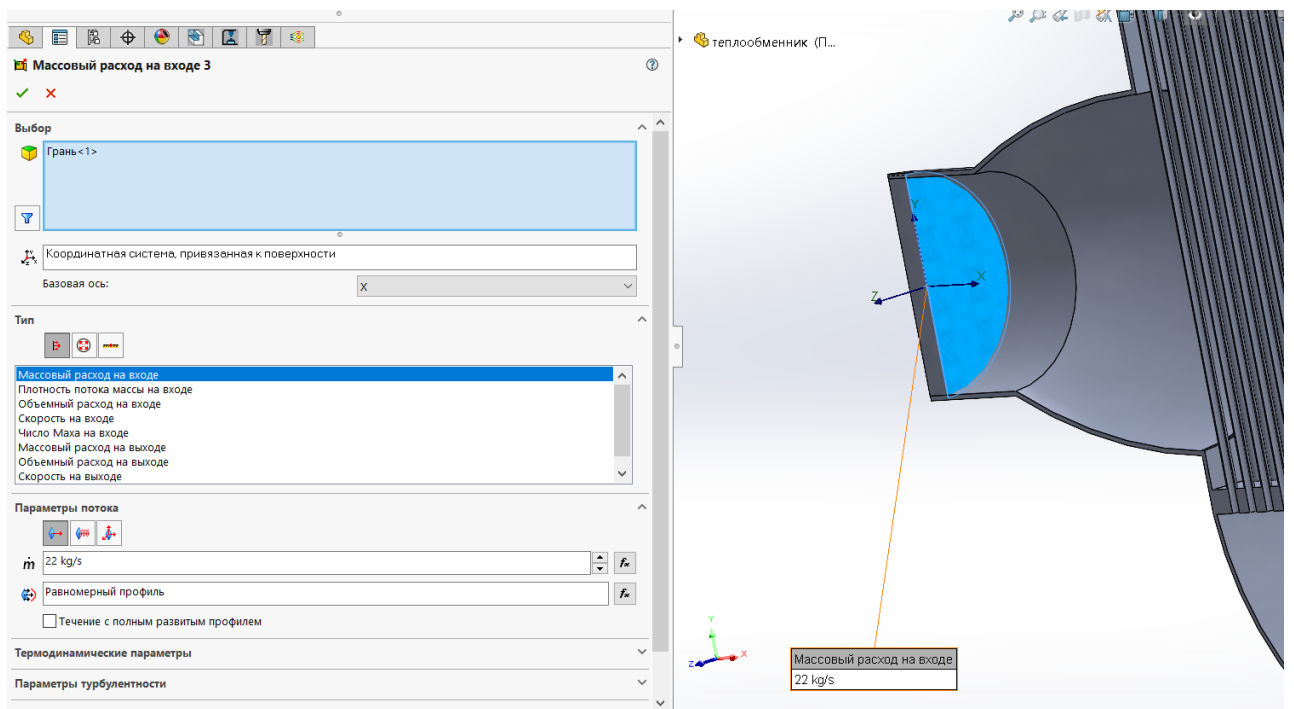


Рисунок 26 – Массовый расход азота



## Задаем статическое давление на выходе метана.

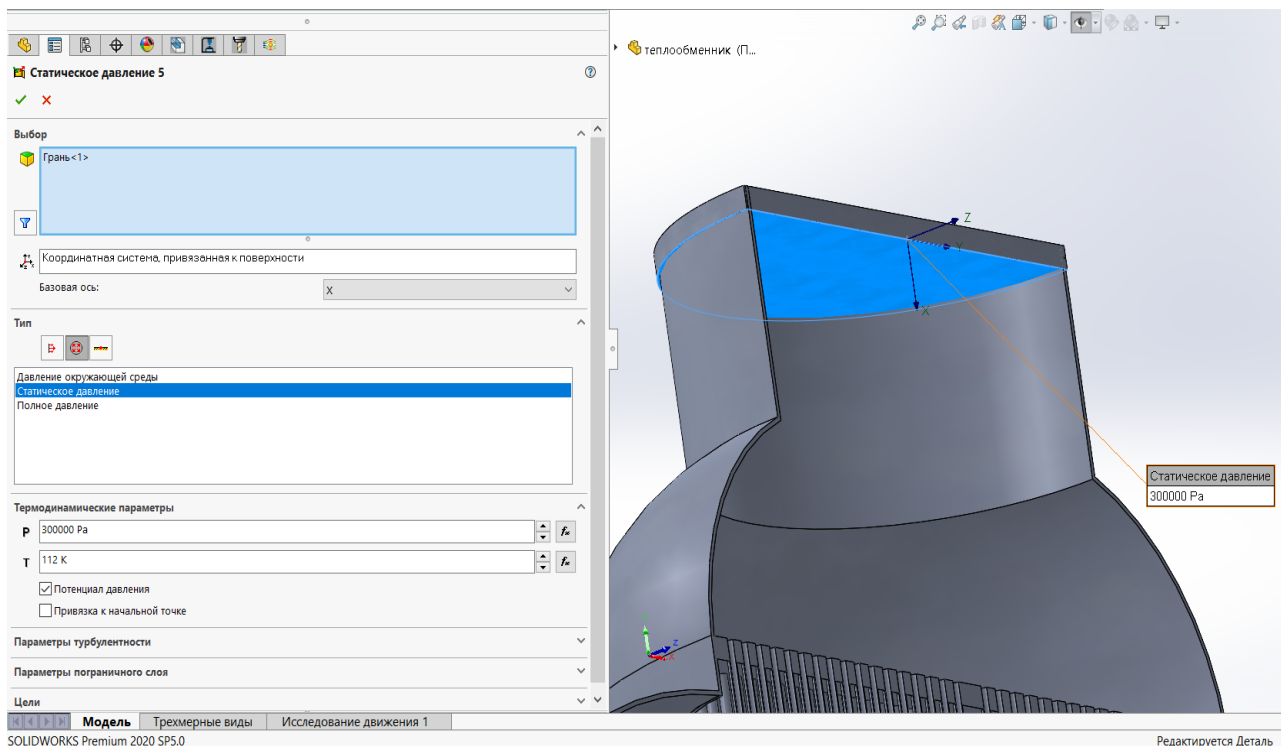


Рисунок 27 – Статическое давление метана

## Задаем статическое давление на выходе азота.

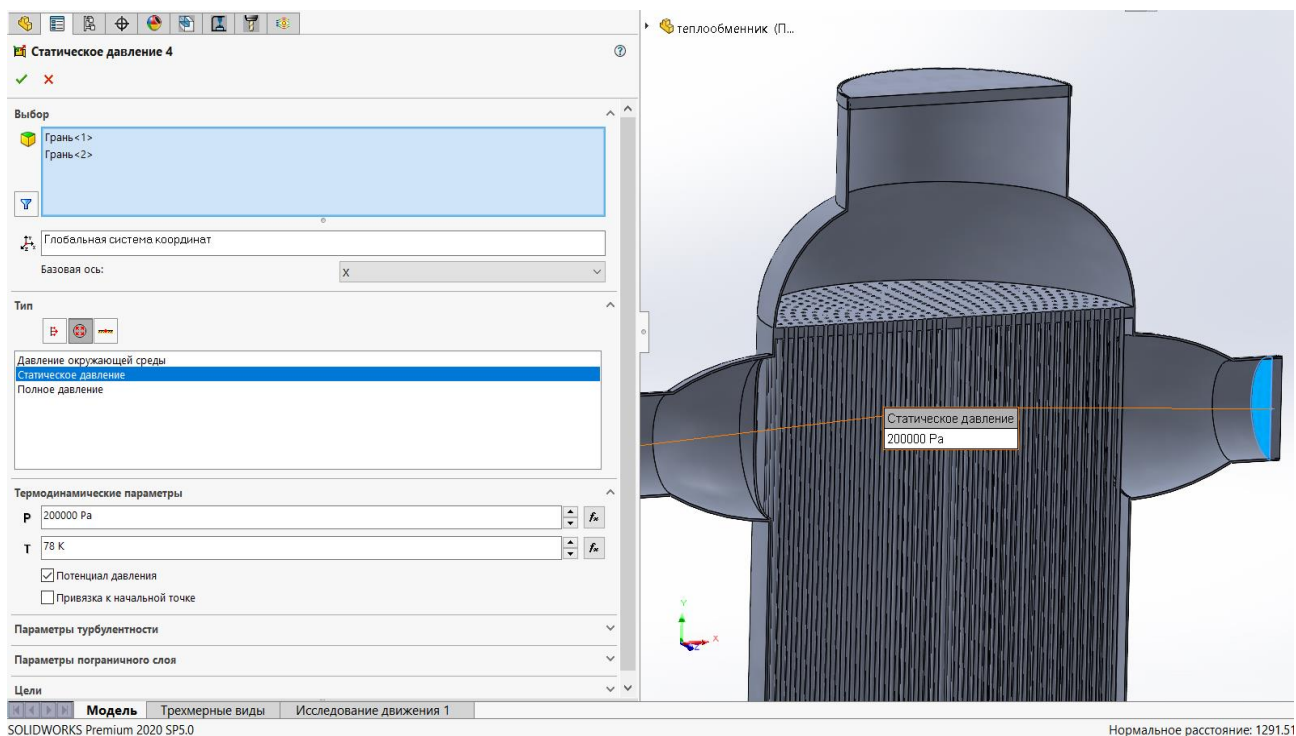


Рисунок 28 – Статическое давление азота

Создаем цели для расчета. Первое выбираем среднее значение температуры текучей среды, второе значение теплового потока и третье средняя скорость.

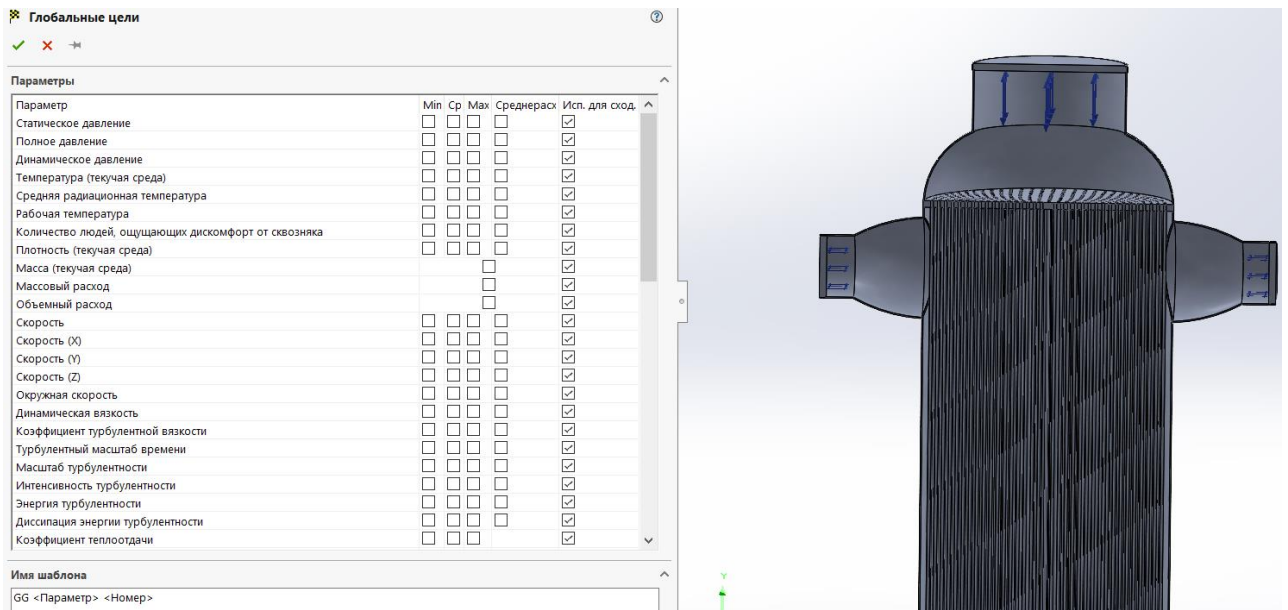


Рисунок 29 – Глобальные цели

В входных данных указывается тип задачи: Внешний.

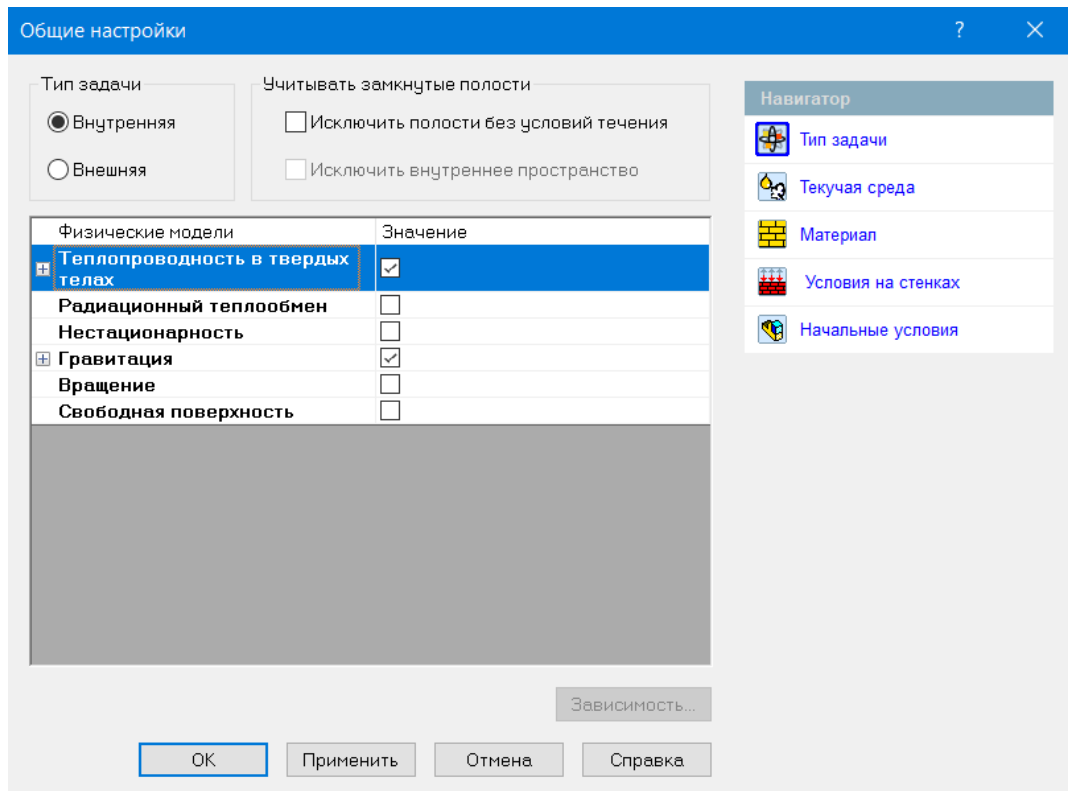


Рисунок 30 – Общие настройки

Выбираем автоматическое распределение глобальной сетки и запускаем расчет.

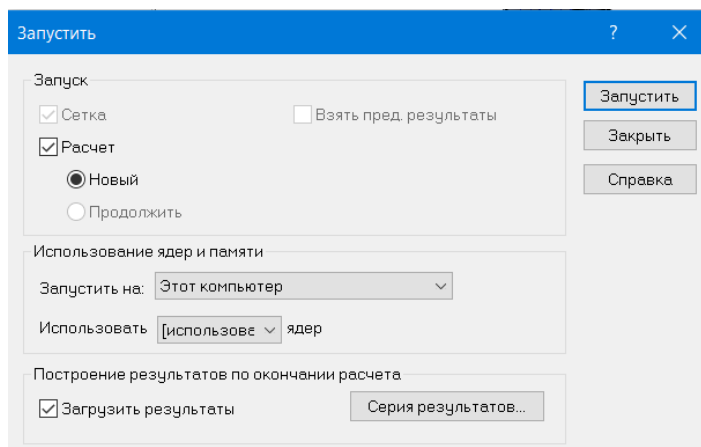


Рисунок 31 – Запуск расчета

Результаты моделирования представлены в таблицах 11-27 и графики на рисунках 32–40: плотность метана, динамическая вязкость метана, удельная теплоемкость ( $C_p$ ) метана, коэффициент теплопроводности метана, плотность азота, динамическая вязкость азота, удельная теплоемкость ( $C_p$ ) азота, коэффициент теплопроводности азота.

### 8.1 Расчетная область

Входные данные.

Определение размера сетки.

Таблица 11 — Размер

X min	-0.668 m
X max	0.668 m
Y min	-0.409 m
Y max	3.459 m
Z min	-0.367 m
Z max	0.367 m
Размер X	1.336 m
Размер Y	3.868 m
Размер Z	0.734 m

Задаются граничные условия.

Таблица 12 — Граничные условия

Двумерное течение	Не задан
По X min	По умолчанию
По X max	По умолчанию
По Y min	По умолчанию
По Y max	По умолчанию
По Z min	По умолчанию
По Z max	По умолчанию

## 8.2 Физические модели

Теплопроводность в твердых телах: Включено

Только теплопроводность в твердых телах: Выключено

Радиационный теплообмен: Выключено

Радиационный теплообмен в газах: Выключено

Нестационарность: Выключено

Гравитационные эффекты: Включено

Вращение: Выключено

Тип течения: Ламинарное и турбулентное

Течение с большим числом Маха: Выключено

Свободная поверхность: Выключено

Шероховатость по умолчанию: 0 micrometer

Таблица 13 — Гравитационные данные

X компонента	0 m/s <sup>2</sup>
Y компонента	-9.81 m/s <sup>2</sup>
Z компонента	0 m/s <sup>2</sup>

Тепловое условие на внешних стенках по умолчанию: Адиабатическая стенка. Определение начальных условий моделирования симуляции.

Таблица 14 — Начальные условия

Термодинамические параметры	Статическое давление: 190000.00 Pa Температура: 115.00 K
Параметры скорости	Вектор скорости Скорость в направлении X: 0 m/s Скорость в направлении Y: 0 m/s Скорость в направлении Z: 0 m/s
Параметры твердого тела	Материал по умолчанию: Steel Stainless 302 Начальная температура твердого тела: 293.20 K
Концентрации	Доля вещества по массе Methane — 0.5000 Nitrogen — 0.5000
Параметры турбулентности	Интенсивность и масштаб турбулентности Интенсивность: 2.00 % Длина: 0.007 m

### 8.3 Настройки материала

Текущая среда

Methane

Nitrogen

Материал

Steel Stainless 302

Определение подобластей течения

Таблица 15 — Подобласть течения 1

Текущая среда	Methane
Поверхности	Грань<1>
Система координат	Глобальная система координат

Базовая ось	X
Термодинамические параметры	Статическое давление: 300000.00 Pa Потенциал давления: Включено Температура: 112.00 K
Параметры скорости	Скорость в направлении X: 0 m/s Скорость в направлении Y: 0 m/s Скорость в направлении Z: 0 m/s
Тип параметров турбулентности:	Интенсивность и масштаб турбулентности
Интенсивность	2.00 %
Длина	0.007 m
Тип течения	Ламинарное и турбулентное
Привязка к начальной точке	Выключено

Таблица 16 — Подобласть течения 2

Текущая среда	Nitrogen
Поверхности	Грань<1>
Система координат	Глобальная система координат
Базовая ось	X
Термодинамические параметры	Статическое давление: 200000.00 Pa Потенциал давления: Включено Температура: 78.00 K
Параметры скорости	Скорость в направлении X: 0 m/s Скорость в направлении Y: 0 m/s Скорость в направлении Z: 0 m/s

Тип параметров турбулентности:	Интенсивность и масштаб турбулентности
Интенсивность	2.00 %
Длина	0.007 m
Тип течения	Ламинарное и турбулентное
Привязка к начальной точке	Выключено

## Граничные условия

Таблица 17 — Массовый расход на входе 1

Тип	Массовый расход на входе
Поверхности	ЗАГЛУШКА4//Поверхность
Система координат	Координатная система, привязанная к поверхности
Базовая ось	X
Параметры потока	Направление векторов течения: По нормали к поверхности Массовый расход: 6.3000 kg/s Течение с развитым профилем: Нет Вид профиля: 0
Термодинамические параметры	Тип температуры: Температура исходных компонентов Температура: 112.00 K
Параметры турбулентности	Интенсивность и масштаб турбулентности Интенсивность: 2.00 % Длина: 0.007 m
Параметры пограничного слоя	Тип пограничного слоя: Турбулентный

Таблица 18 — Массовый расход на входе 2

Тип	Массовый расход на входе
Поверхности	ЗАГЛУШКА1//Поверхность
Система координат	Координатная система, привязанная к поверхности
Базовая ось	X
Параметры потока	Направление векторов течения: По нормали к поверхности Массовый расход: 22.0000 kg/s Течение с развитым профилем: Нет Вид профиля: 0
Термодинамические параметры	Тип температуры: Температура исходных компонентов Температура: 78.00 К
Параметры турбулентности	Интенсивность и масштаб турбулентности Интенсивность: 2.00 % Длина: 0.007 m
Параметры пограничного слоя	Тип пограничного слоя: Турбулентный

Таблица 19 — Статическое давление 3

Тип	Статическое давление
Поверхности	ЗАГЛУШКА2//Поверхность
Система координат	Координатная система, привязанная к поверхности
Базовая ось	X
Термодинамические параметры	Статическое давление: 300000.00 Pa Тип температуры: Температура исходных компонентов



	Температура: 94.00 К
Параметры турбулентности	Интенсивность и масштаб турбулентности Интенсивность: 2.00 % Длина: 0.007 m
Параметры пограничного слоя	Тип пограничного слоя: Турбулентный

Таблица 20 — Статическое давление 4

Тип	Статическое давление
Поверхности	ЗАГЛУШКА5//Поверхность ЗАГЛУШКА3//Поверхность
Система координат	Глобальная система координат
Базовая ось	X
Термодинамические параметры	Статическое давление: 200000.00 Pa Тип температуры: Температура исходных компонентов Температура: 90.00 К
Параметры турбулентности	Интенсивность и масштаб турбулентности Интенсивность: 2.00 % Длина: 0.007 m
Параметры пограничного слоя	Тип пограничного слоя: Турбулентный

## 8.4 Цели

Глобальные цели

Таблица 21 — GG Среднее Температура (текучая среда) 1

Тип	Глобальная цель
Тип цели	Температура (текучая среда)
Расчет	Среднее значение
Система координат	Глобальная система координат
Использовать в сходимости	Включено

Таблица 22 — GG Тепловой поток 3

Тип	Глобальная цель
Тип цели	Тепловой поток
Система координат	Глобальная система координат
Использовать в сходимости	Включено

Таблица 23 — GG Среднерасх Скорость 3

Тип	Глобальная цель
Тип цели	Скорость
Расчет	Среднее значение
Система координат	Глобальная система координат
Использовать в сходимости	Включено

## 8.5 Результаты симуляции

Расчетная сетка

Таблица 24 — Размеры базовой сетки

Число ячеек по X	20
Число ячеек по Y	60
Число ячеек по Z	12

Таблица 25 — Число ячеек

Ячейки	1084068
Ячейки в текучей среде	634260
Ячейки в твердом теле	449808
Иррегулярные ячейки	0
Усеченные ячейки	0

Максимальный уровень дробления: 2

Таблица 26 — Цели

Имя	Единица измерения	Значение	Выполнение процесса	Критерии	Дельта	Использовать в сходимости
GG Среднее Температура (текучая среда) 1	К	86.69	100	0.18991745 1	0.18794807 2	Включено
GG Тепловой поток 3	W	1800. 706	100	342098.324	376.861445	Включено
GG Среднерасх Скорость 3	m/s	0.115	100	0.00109666 973	0.00048482 7216	Включено

Таблица 27 — Min/Max значения

Имя	Минимум	Максимум
Давление [Pa]	177996.39	351151.34
Массовая концентрация Methane [ ]	1.0000	1.0000
Массовая концентрация Nitrogen [ ]	1.0000	1.0000
Объемная концентрация Methane [ ]	1.0000	1.0000
Объемная концентрация Nitrogen [ ]	1.0000	1.0000
Плотность (твердое тело) [kg/m <sup>3</sup> ]	7900.00	7900.00
Плотность (текучая среда) [kg/m <sup>3</sup> ]	422.16	803.76
Скорость [m/s]	0	2.033
Скорость (X) [m/s]	-0.954	1.211
Скорость (Y) [m/s]	-0.875	2.032
Скорость (Z) [m/s]	-0.752	0.824
Температура [K]	78.00	112.00
Температура (твердое тело) [K]	78.00	112.00
Температура (текучая среда) [K]	78.00	112.00

Завихренность [1/s]	0	628.72
Скорость во вращающейся системе координат [m/s]	0	2.033
Скорость во вращающейся системе координат (X) [m/s]	-0.954	1.211
Скорость во вращающейся системе координат (Y) [m/s]	-0.875	2.032
Скорость во вращающейся системе координат (Z) [m/s]	-0.752	0.824
Касательное напряжение [Pa]	0	27.54
Относительное давление [Pa]	-53379.14	51151.34
Индикатор неколлинеарности теплового потока [ ]	0	1.0000000
Индикатор теплового сопротивления [ ]	0	1.0000000
Коэффициент теплоотдачи [W/m <sup>2</sup> /K]	0	639.183
Перегрев выше температуры плавления [K]	-1595.150	-1561.150
Плотность теплового потока [W/m <sup>2</sup> ]	1.966e-06	1067581.459

Поверхностная плотность теплового потока [W/m <sup>2</sup> ]	-103793.007	135319.122
Поверхностная плотность теплового потока (конвекция) [W/m <sup>2</sup> ]	-8.574e+07	1.410e+08
Поверхностная плотность теплового потока (теплопроводность) [W/m <sup>2</sup> ]	0	0
Акустическая мощность [W/m <sup>3</sup> ]	0	3.446e-13
Уровень акустической мощности [dB]	0	0

Инженерная база данных

Материал: Steel Stainless 302

Путь: Материал Предопределенные\Alloys

Плотность: 7900.00 kg/m<sup>3</sup>

Удельная теплоемкость: 500.0 J/(kg\*K)

Тип проводимости: Изотропная

Коэффициент теплопроводности: 16.3000 W/(m\*K)

Электропроводность: Проводник

Удельное сопротивление: 7.2000e-07 Ohm\*m

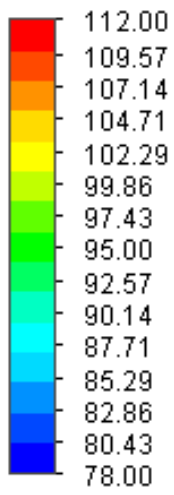
Радиационные свойства: Нет

Температура плавления: Да

Температура: 1673.15 K

Жидкости: Methane

Путь: Жидкости Предопределенные



Температура (текущая среда) [K]

Картина в сечении 1: заливка

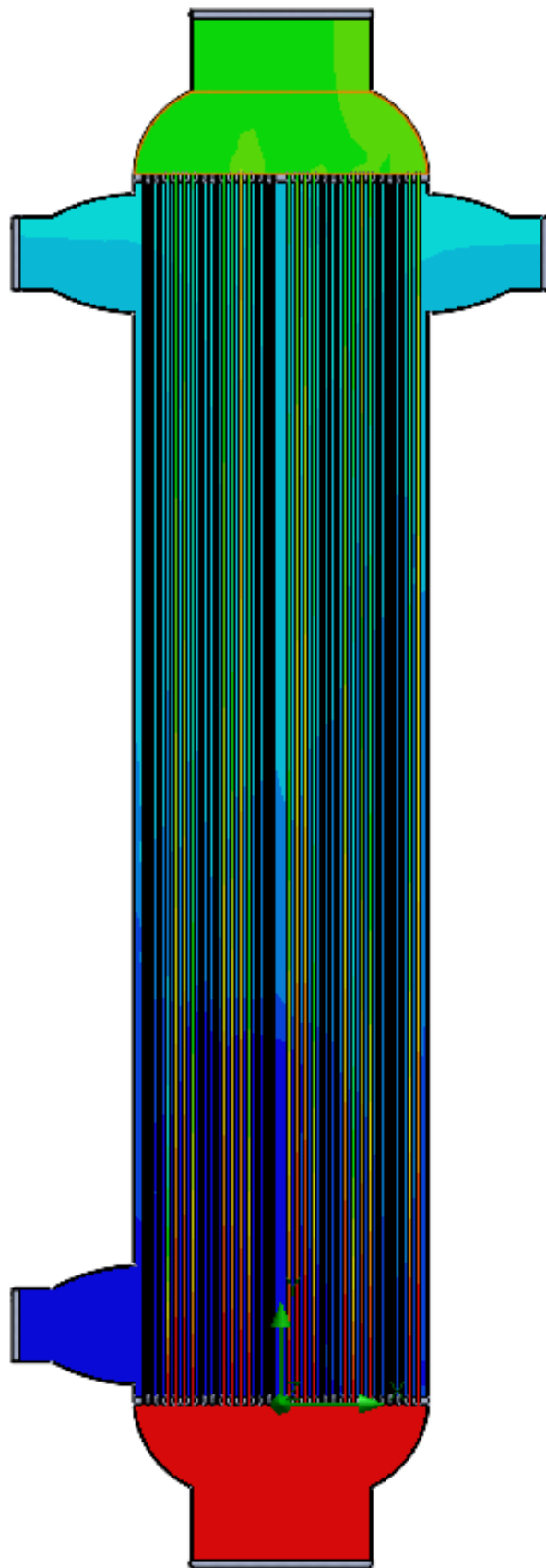


Рисунок 32 – Распределение температур в ТОА

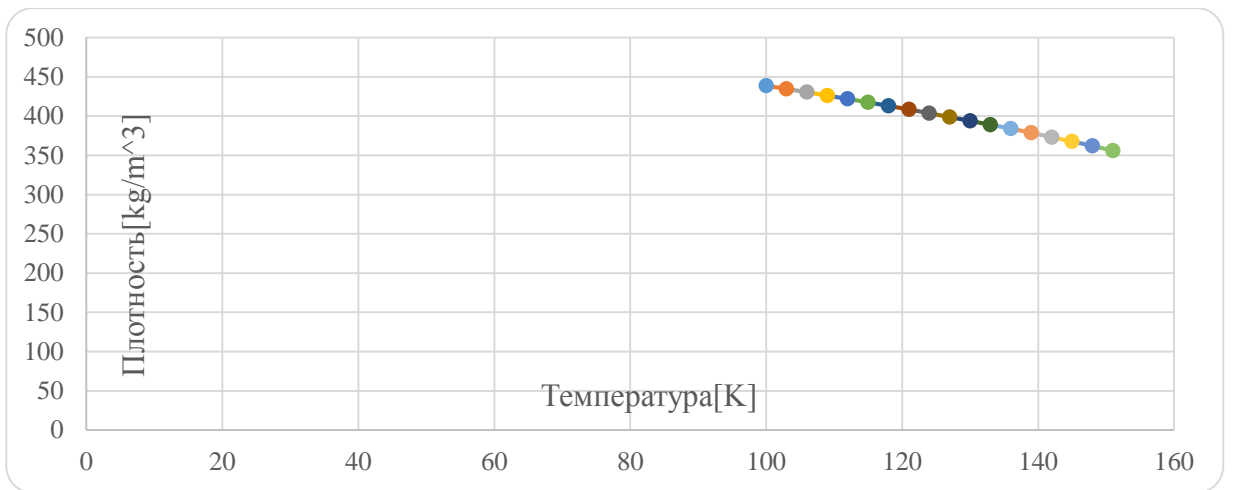


Рисунок 33 – График плотности метана

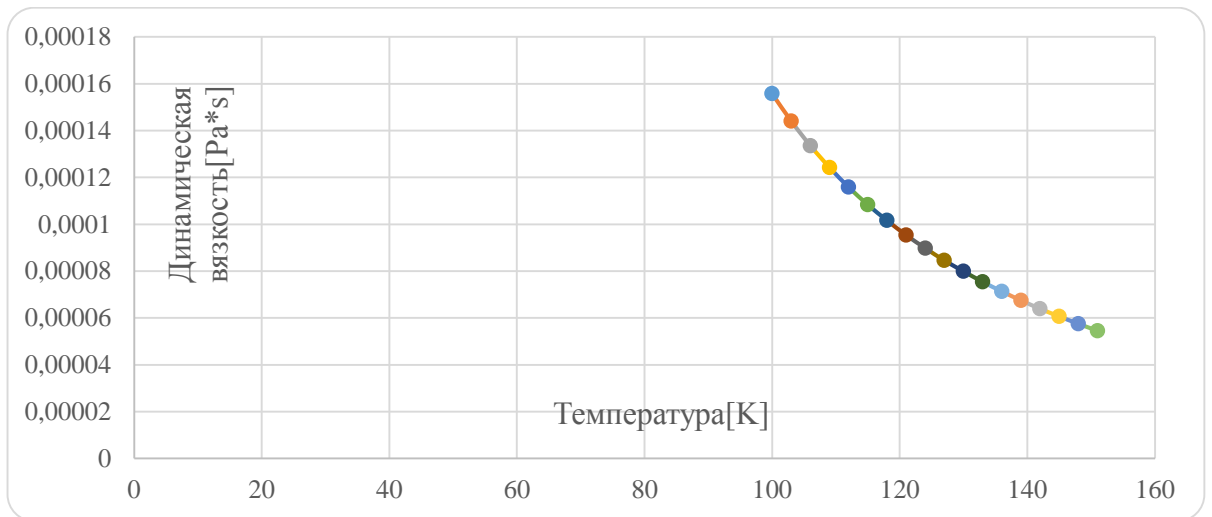


Рисунок 34 – График динамической вязкости метана

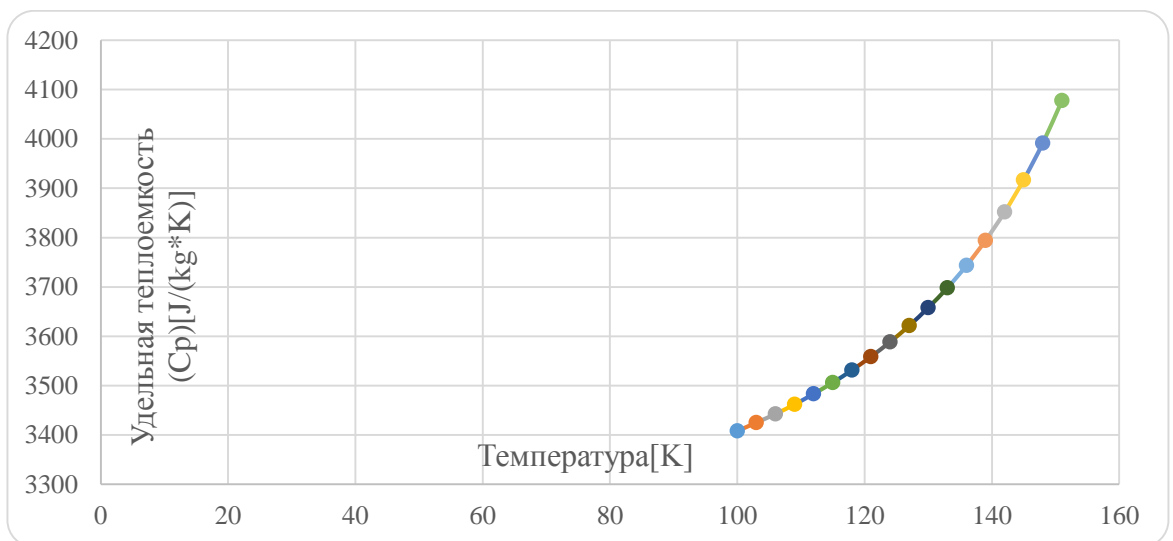


Рисунок 35 – График удельной теплоемкости (Cp) метана



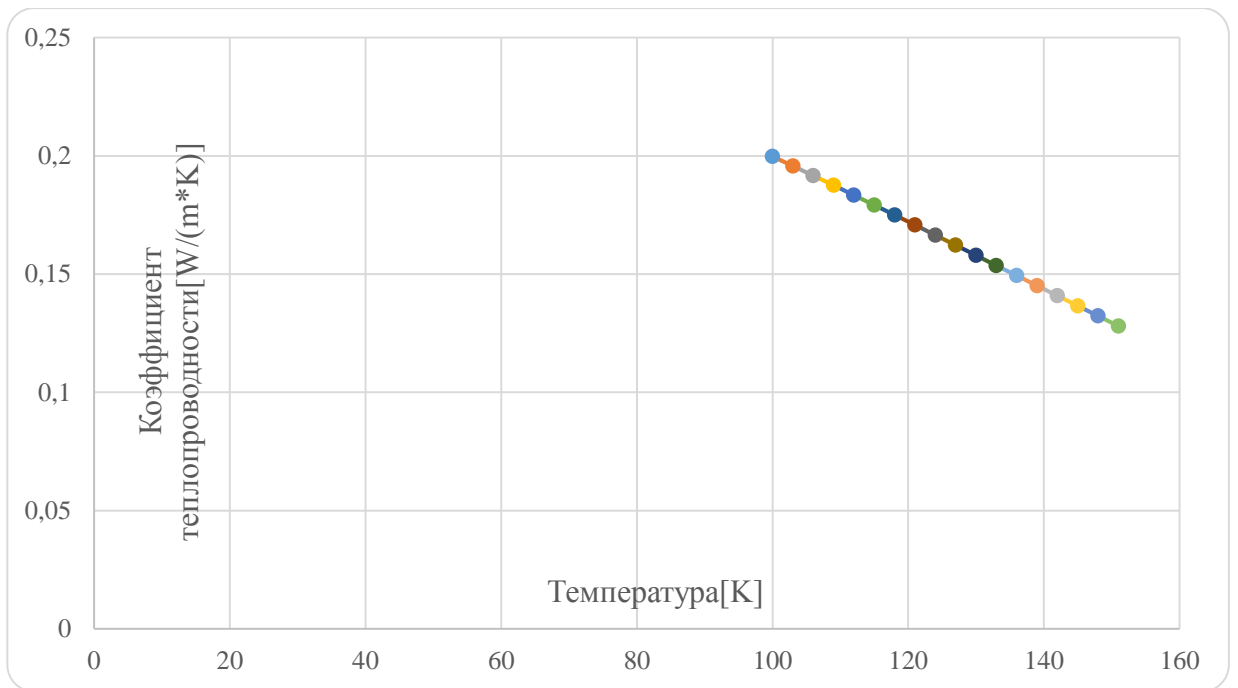


Рисунок 36 – График коэффициента теплопроводности метана

Эффект кавитации: Нет

Радиационные свойства: Нет

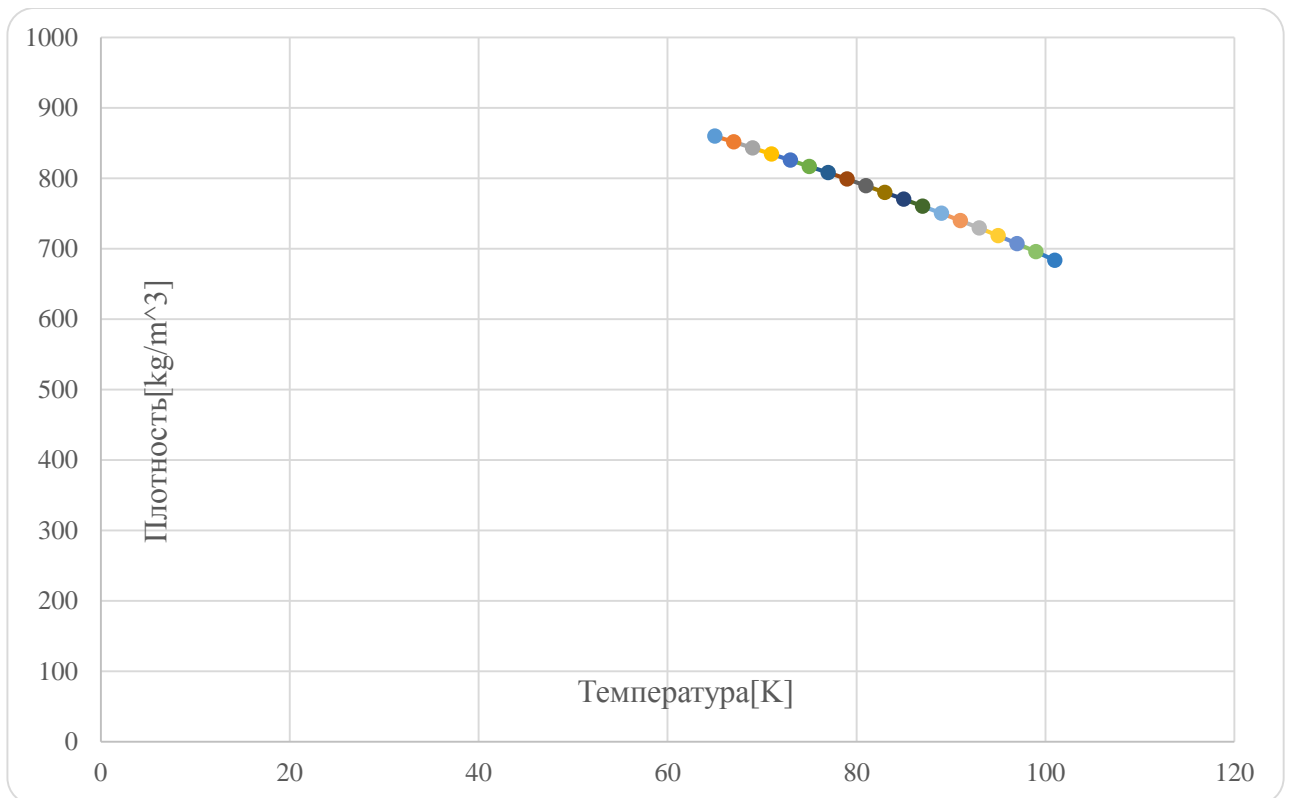


Рисунок 37 – График плотности азота

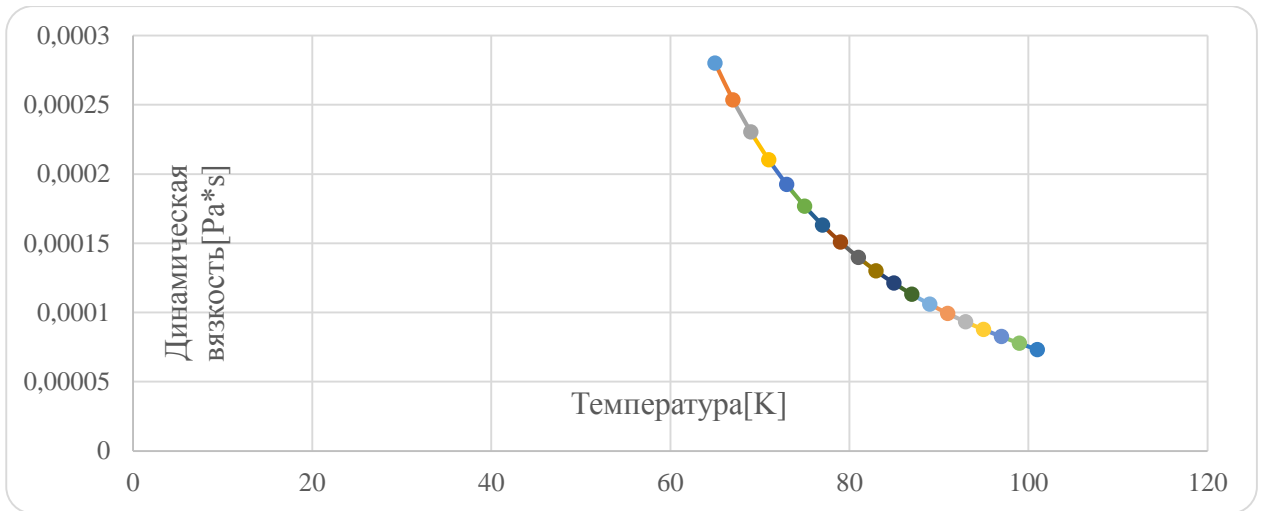


Рисунок 38 – График динамической вязкости азота

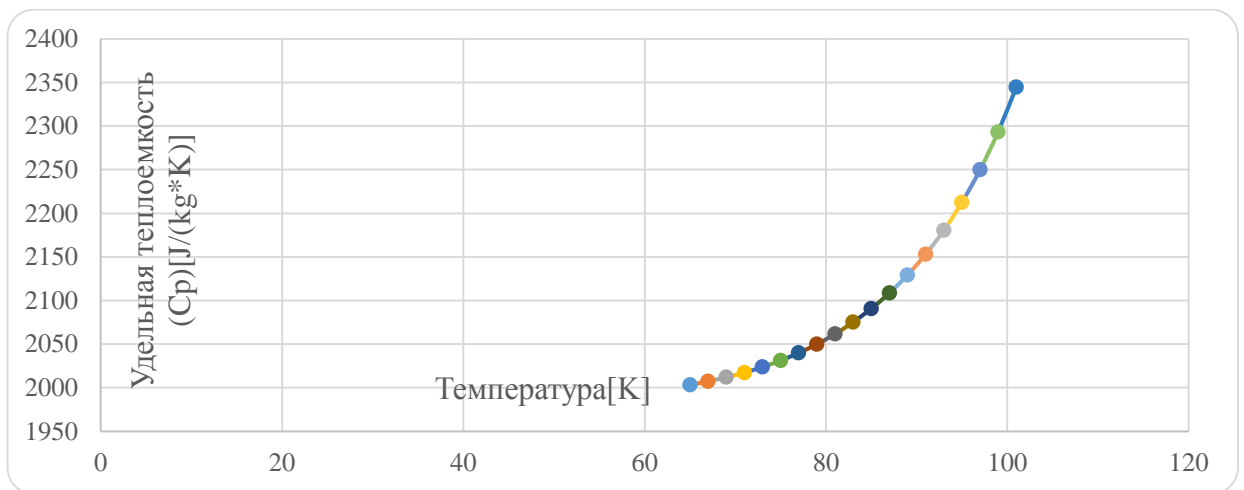


Рисунок 39 – График удельной теплоемкости (Cp) азота

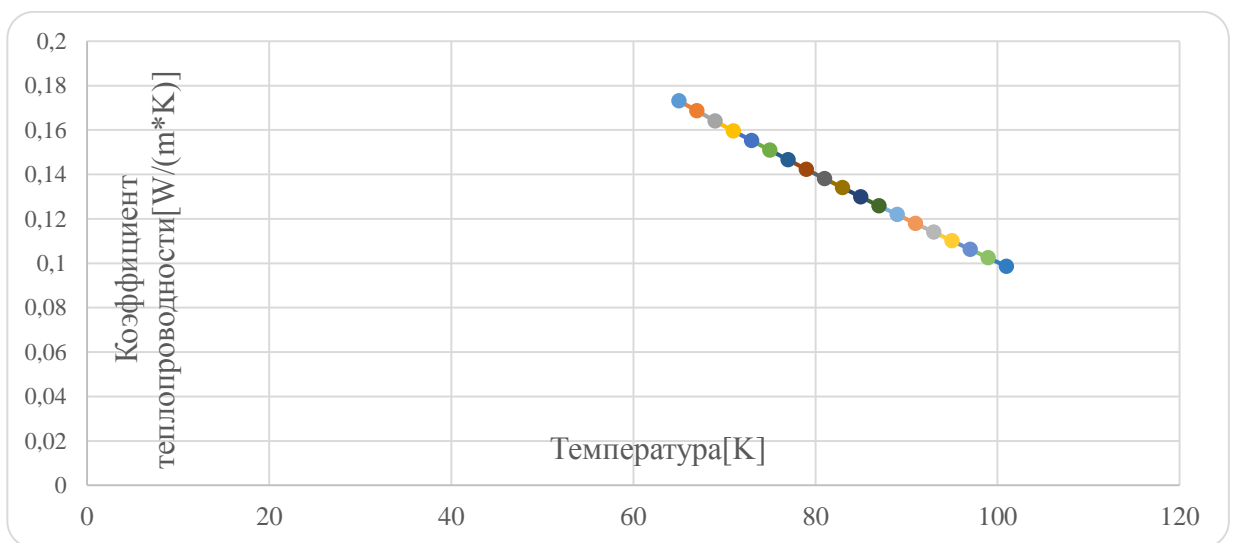


Рисунок 40 – График коэффициента теплопроводности азота

## 9 БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ РАБОТЕ С МЕТАНОМ

### 9.1 Основные положения

1. 1 Техника безопасности на производстве является важнейшим вопросом, связанным с жизнедеятельностью людей и государственной собственностью. Операторы должны получить базовые знания по технике безопасности на производстве. Они должны осознанно соблюдать соответствующие правила и политику в области техники безопасности для обеспечения безопасного и цивилизованного производства.

2. Основным компонентом технологического газа, применяемого в данной установке, является метан. Класс пожарной опасности по природному газу соответствует классу А «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность» ГОСТ 12.1.004-91.

3. Согласно действующим нормативам «Взрыво- и пожароопасные среды при проектировании электрических установок и силовых агрегатов», природный газ отнесен к взрывоопасным газообразным средам. Класс, категория, группа следующие:

- Класс: II;
- Категория: В;
- Группа: Т4, II ВТ4.

Категория зоны по содержанию взрывоопасных газообразных веществ в воздухе:

Зона 2 (не допускается содержание взрывоопасных смесей в воздухе при нормальной работе оборудования, либо допускается на короткий промежуток времени)

### 9.2 Техника безопасности и меры предосторожности при работе с вредными веществами

Метан – Бесцветный, без запаха, легко воспламеняющийся газ. Относительная плотность в жидком агрегатном состоянии  $425 \text{ кг/м}^3$  ( $-164 \text{ }^\circ\text{C}$ ), относительная плотность в газообразном агрегатном состоянии  $550 \text{ кг/м}^3$ , температура воспламенения  $538 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура кипения  $-161,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , плохо

растворим в воде, предел взрыва от 5,3 до 15%, при нахождении в воздухе образует взрывоопасную смесь. Опасность взрыва при прямом контакте с источником тепла либо открытым огнем. Класс пожаро- взрывоопасности соответствует классу А.

Метан в основном нетоксичен, однако при высокой концентрации в воздухе происходит вымещение кислорода из воздуха, что приводит к удушью. При концентрации в воздухе от 25% до 30% появляется головная боль, головокружение, обнаруживается повышенная утомляемость, потеря ориентации, учащенное сердцебиение и дыхание, атаксия. Продолжительное нахождение в такой среде приводит к удушью и смерти. Контакт кожи с жидким метаном вызывает обморожение.

При вдыхании метана следует незамедлительно покинуть опасный участок и выйти (вывести пострадавшего) на свежий воздух. В случае затрудненного дыхания обеспечить постоянное поступление кислорода. В случае остановки дыхания предпринять меры по искусственному дыханию пострадавшего и незамедлительно направить в лечебное учреждение.

### **9.3 Порядок действий при утечке метана**

При проведении мер по локализации утечки метана в обязательном порядке следует использовать персональные средства защиты органов дыхания, незамедлительно вывести персонал на свежий воздух, ограничить доступ к помещению либо территории с высокой концентрацией метана. Обеспечить приток свежего воздуха, увеличить обмен метановой среды с чистым воздухом, прекратить подачу газа, если таковая имеет место.

### **9.4 Симптомы отравления метаном**

При чрезвычайной ситуации и неквалифицированным пользованием газового оборудования случается интоксикация опасным газом. А при скопление в воздухе до 20 % опасного вещества может привести к смерти.

Также люди, работающие на химпроизводстве, сталкиваются с вредными парами веществ и подвергаются воздействию малых доз газа на протяжении долгого времени.

При отравлении газами наблюдаются следующие признаки:

- Головокружение, шум в ушах, сонливость, слабость;
- Потеря координации, нарушение речи;
- Резь в глазах, слезотечение;
- Удушье, дефицит воздуха;
- Ускоренное биение сердца;
- Гипотония;
- Тошнота, приступы рвоты;
- Посинение кожных покровов и оболочек слизистых.

При тяжелых случаях отравления случается обморок, судороги, коматозное состояние, остановка дыхания и сердца.

При постоянном воздействии газа возможно появление хронической формы отравления. Это сопровождается частыми болями в голове, низким давлением, бледностью, вялостью, недомоганием, пониженной работоспособностью, упадком сил. Так же могут наблюдаться симптомы расстройства нервной системы, например чрезмерная раздраженность, нервозность, ухудшение сна, снижение когнитивных функций.

#### **9.5 Первая помощь пострадавшему до приезда медработников**

1. Отвести отравившегося на воздух, подальше от опасной зоны;
2. Расстегнуть воротник и одежду, обеспечив подачу кислорода;
3. Приподнять так, чтобы голова была ниже уровня ног, это предотвратит гипоксию мозга;
4. Поместить на лоб что-то холодное (намоченную водой ткань, пакет со льдом);
5. Организовать пострадавшему обильное питье (воду или теплый чай).

При остановке дыхания и отсутствии пульса необходимо провести закрытый массаж сердца и искусственное дыхание.

#### **9.6 Индивидуальные средства защиты**

Выдаваемые работникам средства индивидуальной защиты должны соответствовать характеру и условиям работы и обеспечивать безопасность

труда.

Персонал, обслуживающий опасные производственные объекты, должны быть обеспечены сертифицированными средствами индивидуальной защиты различных частей тела, смывающими и обезвреживающими средствами. Спецодежда, предназначенная для использования на взрывопожароопасных объектах (участках производства), должна быть изготовлена из термостойких и антистатических материалов.

Сроки пользования средствами индивидуальной защиты исчисляются со дня фактической выдачи их работникам.

Ответственность за своевременное и в полном объеме обеспечение работников средствами индивидуальной защиты, за организацию контроля за правильностью их применения работниками возлагается на работодателя в установленном законодательством порядке.

Работающие в местах, где возможно образование концентрации вредных газов, паров и пыли в воздухе выше санитарных норм, предельно-допустимых концентраций (ПДК) должны обеспечиваться соответствующими средствами индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД).

При очень высоких концентрациях нефтяного газа применяются изолирующие дыхательные аппараты. При невысоких концентрациях, нормальном содержании кислорода – фильтрующие противогазы с маркой коробки «А».

СИЗОД, выдаваемые рабочим, надлежит подбирать по размерам и хранить на рабочих местах в особых шкафах, каждое в своей ячейке. На каждой ячейке и на сумке противогаза должна быть укреплена бирка с указанием фамилии владельца, марки и размера маски.

СИЗОД должны проверяться и заменяться в сроки, указанные в их технических паспортах и заводских инструкциях по эксплуатации.

На рабочих местах должна иметься инструкция по применению соответствующих СИЗОД, определению исправности их отдельных частей, а также по уходу, хранению и дезинфекции.

Периодические проверки, ремонт и отбраковка СИЗОД должны осуществляться в соответствии с инструкцией по эксплуатации.

При работе в условиях пылеобразования работники должны работать в противопылевых респираторах, защитных очках и комбинезонах.

Работники должны быть обучены правилам пользования, проверки и хранения СИЗОД. Тренировочные занятия по правилам их применения и проверки должны проводиться по графику, утвержденному техническим руководителем коллектива.

На каждом опасном производственном объекте должен быть аварийный запас СИЗОД соответствующих типов и марок. Количество фильтрующих аварийных противогазов для каждого объекта комплектуется из расчета 3-5 комплектов соответствующих марок. В каждом комплекте должен быть набор шлем-масок всех размеров. Количество аварийных шланговых противогазов ПШ-1 и ПШ-2 должно быть не менее двух комплектов.

На каждом опасном производственном объекте должны быть дежурные средства индивидуального пользования коллективной защиты:

- 1 Аварийный запас с предохранительным поясом и спасательной веревкой;
- 2 Аптечка медицинская;
- 3 Запрещается запирать на замки аварийный запас противогазов.

Целостность пломб аварийного запаса проверяется при приеме и сдаче смены обслуживающим персоналом. Наличие и состояние аварийного запаса не реже одного раза в месяц проверяется в соответствии с графиком, утвержденным техническим руководителем организации. Персонал объекта должен знать места хранения рабочих и аварийных СИЗОД.

Ответственность за готовность к применению средств индивидуальной и коллективной защиты несет технический руководитель организации, за правильность их использования непосредственно на месте проведения работ – исполнитель работ.

Работодатель организует надлежащий уход за средствами индивидуальной

и коллективной защиты и их хранение, своевременно осуществляет химчистку, стирку, ремонт, дегазацию, дезактивацию, обезвреживание и обеспыливание специальной одежды, а также ремонт, дегазацию, дезактивацию и обезжиривание специальной обуви и других средств индивидуальной защиты.

### **9.7 Средства коллективной защиты**

Для создания нормативных условий труда на установке предусмотрено:

1 Механизация и комплексная автоматизация технологических процессов с отображением на компьютере всех параметров, характеризующих безопасную работу оборудования;

2 Система противоаварийной защиты технологического процесса (система ПАЗ), которая автоматически переводит отдельные стадии процесса или всю установку в безопасный режим эксплуатации;

3 Приточно-вытяжная вентиляция производственных и вспомогательных помещений с автоматическим поддержанием параметров воздуха в помещениях;

4 Общее и местное (локальное) освещение производственных помещений, рабочих мест и наружной установки;

5 Трубопроводы, аппараты и арматура наружной установки, имеющие температуру поверхности более 60 °С, теплоизолируются;

6 Вращающиеся части насосов, вентиляторов оборудованы защитными кожухами.

Во взрывоопасных зонах в соответствии с ТУ-ГАЗ-86, установлены сигнализаторы для контроля до взрывоопасных концентраций паров углеводородов с фиксацией аварийной загазованности по месту и в операторной.

Для обеспечения обмена текущей информацией оператора с обслуживающим персоналом, находящимся на наружной территории установки, предусмотрена телефонная оперативно-технологическая связь.

Дополнительные средства защиты: очки защитные, перчатки диэлектрические, пояса предохранительные, спасательные веревки, шланговые противогазы с комплектом масок, аварийный запас фильтрующих противогазов,



медицинская аптечка являются дежурными и размещаются в операторной, в специальном шкафу.

Работающие должны быть ознакомлены с назначением защитных средств и обучены правилам обращения с ними с учетом конкретных условий.

## 10 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Целью экономического расчета является определение суммарных расходов на приобретение материала для теплообменного аппарата.

### 10.1 Выбор материала

В качестве материала для кожуха и труб, выбрана нержавеющая сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72. Данная сталь обладает высокими эксплуатационными качествами, что позволяет ее использовать в различных отраслях промышленности. В химической промышленности из этого сплава изготавливают емкости и трубопроводы для хранения и транспортировки различных агрессивных веществ – азотной, уксусной, фосфорной кислоты, а также соединений на их основе.

Нержавеющий прокат выпускается в широком ассортименте, такие как круг нержавеющий, нержавейка лист, проволока, кованные заготовки и труба нержавеющая, что существенно расширяет области применения материала, позволяя изготавливать изделия разного назначения.

Химический состав сплава непосредственно влияет на физические и технические свойства. В химический состав нержавеющей стали 12Х18Н10Т входит:

- Количество углерода (С) 0.12%;
- Массовая доля хрома (Cr) 18%;
- Процентное соотношение никеля (Ni) 10%;
- Наличие в составе титана (Ti) допускается до 1.5%.

### 10.2 Расчет массы ТОО

1. Масса  $m_k$  (кг) кожуха в ТОО определяется исходя из габаритов:  
Исходные данные:  $D_n = 733$  мм,  $L = 3050$  мм,  $S = 4$  мм,  $\rho = 7950$  кг/м<sup>3</sup>.  
Расчет производится по формуле 5.

$$m_k = \pi \cdot \rho \cdot S \cdot (D_n - S) \cdot L = 222,13 \text{ кг}; \quad (5)$$

Где  $D_n$  – наружный диаметр кожуха теплообменника;

$L$  – длина кожуха в аппарате;

$\rho$  – плотность материала;

$S$  – толщина стенки.

2. Масса  $m_{тр}$  (кг) труб в аппарате определяется по формуле 6.

Исходные данные:  $D_n = 10$  мм,  $L = 3050$  мм,  $S = 1$  мм,  $\rho = 7950$  кг/м<sup>3</sup>,  $n = 617$  шт.

$$m_{тр} = \pi \cdot \rho \cdot S \cdot (D_n - S) \cdot L \cdot n = 410,922 \text{ кг}; \quad (6)$$

где  $D_n$  – наружный диаметр труб теплообменника;

$L$  – длина труб в аппарате;

$\rho$  – плотность материала;

$S$  – толщина стенки;

$n$  – число трубок в аппарате.

3. Масса  $m_{тр\_вх\_мет}$  (кг) труб для входа и выхода метана в теплообменный аппарат определяется по формуле 7.

Исходные данные:  $D_n = 450$  мм,  $L = 405$  мм,  $S = 4$  мм,  $\rho = 7950$  кг/м<sup>3</sup>.

$$m_{тр\_вх\_мет} = \pi \cdot \rho \cdot S \cdot (D_n - S) \cdot L = 17,92 \text{ кг}; \quad (7)$$

где  $D_n$  – наружный диаметр труб теплообменника;

$L$  – длина труб в аппарате;

$\rho$  – плотность материала;

$S$  – толщина стенки.

Масса труб входа и выхода метана одинаковая  $m_{тр\_вх\_мет} = m_{тр\_вых\_мет}$ .

4. Масса  $m_{тр\_вх\_азота}$  (кг) труб для входа и выхода азота в теплообменный аппарат определяется по формуле 8.

Исходные данные:  $D_n = 187$  мм,  $L = 331,9$  мм,  $S = 4$  мм,  $\rho = 7950$  кг/м<sup>3</sup>.

$$m_{\text{тр\_вх\_азота}} = \pi \cdot \rho \cdot S \cdot (D_n - S) \cdot L = 6,03 \text{ кг}; \quad (8)$$

где  $D_n$  – наружный диаметр труб теплообменника;

$L$  – длина труб в аппарате;

$\rho$  – плотность материала;

$S$  – толщина стенки.

Масса труб входа и выхода метана одинаковая  $m_{\text{тр\_вх\_мет}} = m_{\text{тр\_вых\_мет}}$ .

5. Общая масса  $M$  (кг) теплообменного аппарата определяется суммой всех масс по формуле 9.

$$M = m_k + m_{\text{тр}} + m_{\text{тр\_вх\_мет}} + m_{\text{тр\_вых\_мет}} + m_{\text{тр\_вх\_азота}} + 2 \cdot m_{\text{тр\_вых\_азота}} = 686,982 \text{ кг} \quad (9)$$

### 10.3 Расчет стоимости материала

Цена на листы нержавеющей стали 12Х18Н10Т в среднем идет от 268 рублей за килограмм.

Итоговая стоимость закупки на материал получается:

$$686,982 \cdot 268 = 184111 \text{ рублей } 20 \text{ копеек.}$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения бакалаврской работы были проанализированы структура и технические характеристики ракеты-носителя Союз–7 «Амур-СПГ», системы заправки РН и варианты криогенных систем охлаждения сжиженного метана, необходимые устройства и принципы действия теплообменного оборудования, а так же технологические параметры процесса.

Разработана принципиальная схема криогенной системы охлаждения сжиженного метана посредством азота, его хранением и последующей заправкой в РН Союз–7.

Выполнен тепловой расчет кожухотрубного прямоточного теплообменного аппарата, определена требуемая поверхность.

Построен необходимый чертеж кожухотрубного теплообменного аппарата и создана компьютерная 3Д модель ТОА, далее произведена проверочная симуляция для проверки работоспособности и соответствию поставленной задачи.

Проведена оценка безопасности использования сжиженного метана на криогенной станции. На основе руководящей документации был составлен план безопасной и качественной работы.

Выполнен экономический расчет для определение суммарных расходов на приобретение материала теплообменного аппарата.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. А. Александров. Особенности создания и развития криогенных систем ракетно-космических стартовых комплексов «Союз». / Александров А. А., Бармин И. В., Кунис И. Д., Чугунков В. В. – Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». № 2. 2016. – 7 – 27 с.
2. Аронсон, К. Э. Теплообменники энергетических установок : учебник для вузов / К. Э. Аронсон, С. Н. Блинков, В. И. Брезгин – под ред. Ю. М. Бродова. – Екатеринбург : Сократ, 2003. – 986 с.
3. Васянина А. Ю. Перспективы использования компонентов топлива метан-кислород в жидкостных ракетных двигателях. / А. Ю. Васянина, А. А. Тонких, Д. А. Савчин, Д. А. Ермоленко. – Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Т 1. 2017. – 121 – 123 с.
4. Горбачев, С.П. Изменение компонентного состава СПГ при его длительной транспортировке и хранении, методы кондиционирования / С.П. Горбачев, И.С. Медведков – Газовая промышленность. 2018. №10 [Электронный ресурс] // Киберленинка: офиц. сайт. – 2015. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmenenie-komponent...> – 19.02.2021.
5. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/9051953>. – 09.06.2021.
6. ГОСТ 27577–2000. Газ природный топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания. Технические условия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200017921> – 01.03.2021.
7. ГОСТ 5542–87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200001400> – 01.03.2021.
8. ГОСТ Р 53677-2009. Нефтяная и газовая промышленность. Кожухотрубчатые теплообменники. Технические требования. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200081011> –

01.06.2021.

9. ГОСТ Р 56021–2014. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200110779> – 01.03.2021.

10. Дытнерский, Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии : Пособие по проектированию / Ю. И. Дытнерский. – М. : ООО ИД «Альянс», 2010. – 496 с.

11. Карпов. А. Б. Перспективы использования сжиженного природного газа в качестве топлива ракетных двигателей. / А. Б. Карпов. – Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (Кемерово) 2018. – 408.1 – 408.3 с.

12. Коробков А. А. Сопоставительный анализ конкурирующих вариантов принципиальной технологической схемы системы охлаждения сжиженного метана для заправки ракеты-носителя недогретым метаном повышенной плотности / А. А. Коробков, М. В. Кулик, В. В. Редькин, С. С. Сергеев, А. И. Смородин – Вестник Международной академии холода. № 3. 2020. – 10 – 20 с.

13. Коробков А. А. Структурно-технологическая схема азотной системы охлаждения сжиженного метана для заправки ракеты-носителя среднего класса / А. А. Коробков, М. В. Кулик, В. В. Редькин, С. С. Сергеев, А. И. Смородин – Вестник Международной академии холода. № 4. 2020. – 27 – 36 с.

14. Таранова Л.В., Теплообменные аппараты и методы их расчета: учебное пособие / Л. В. Таранова. – Тюмень : 2-е изд., перераб. и доп. ТюмГНГУ, 2012. – 198 с.

15. ТУ 51 03-03–85. Газ природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания. Технические условия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200059065> – 01.03.2021.