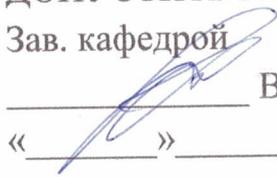


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы
Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика
Направленность (профиль) образовательной программы Ракетно-космическая техника

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой


В.В. Соловьёв

« _____ » _____ 2025 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Разработка системы очистки метанового топлива для заправки перспективных ракет-носителей

Исполнитель

студент группы 1109-об1



(подпись, дата)

А.С. Носачев

Руководитель

профессор, д-р техн. наук



(подпись, дата)

А.Д. Плутенко

Консультант

доцент

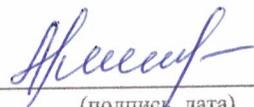


(подпись, дата)

К.А. Насуленко

Консультант по БЖД

доцент, канд. тех. наук



(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль

старший преподаватель СиТРК



(подпись, дата)

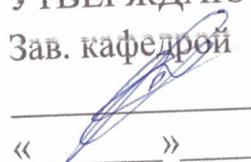
М.А. Аревков

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

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

 В.В. Соловьёв
« _____ » _____ 2025 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Носачева Андрея Сергеевича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Разработка системы очистки метанового топлива для заправки перспективных ракет-носителей

(утверждена приказом от 03.04.2025 № 878-уч)

2. Срок сдачи студентом законченного проекта: 06 июня 2025 года

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

4. Содержание выпускной квалификационной работы: Требования, предъявляемые к СПГ для ракетной техники; определение технологии очистки и принципа работы газоочистного оборудования; разработка технологической схемы системы очистки; расчеты мембранного аппарата и адсорбера; чертежи мембранного аппарата и адсорбера; симуляция газодинамического потока в адсорбере

5. Перечень материалов приложения: Цель и задачи бакалаврской работы, принципиальная и технологическая схема очистки, чертежи корпусов мембранного аппарата и адсорбера, расчеты мембранного аппарата и адсорбера, симуляция газодинамического потока в адсорбере, заключение работы

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе: Козырь А.В.

доцент, канд. тех. наук; Насуленко К.А., доцент

7. Дата выдачи задания: 29 мая 2025 года

Руководитель выпускной квалификационной работы: Плутенко А. Д.,
профессор, д-р техн. наук

Задание принял к исполнению: 29.05.2025г.



РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 60 с., 22 рисунка, 10 таблиц, 13 источников.

ПРИРОДНЫЙ ГАЗ, МЕТАН, ГАЗООЧИСТКА, МЕМБРАННЫЙ АППАРАТ, АДСОРБЕНТ, АДСОРБЕР

Система очистки предназначена для подготовки метанового топлива соответствующего качества для заправки ракет-носителей.

Цель работы: Разработка принципиальной схемы системы очистки природного газа непосредственно на космодроме для заправки ракет-носителей и разработка конструкций мембранного модуля и адсорбера.

Задачи:

- Провести анализ существующего оборудования и способов очистки природного газа;
- Определить необходимые устройства и принципы действия оборудования очистки, а так же технологические параметры процесса;
- Разработать принципиальную схему очистки природного газа;
- Выполнить расчет мембранного модуля очистки и сделать его чертеж;
- Выполнить расчет адсорбера и сделать его чертеж;
- Провести проверочную симуляцию для проверки работоспособности адсорбера.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1 ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СПГ ДЛЯ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ	10
2 ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА ДЛЯ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ	13
3 ОСНОВНЫЕ ТИПЫ И ПРИНЦИП РАБОТЫ МЕМБРАННЫХ МОДУЛЕЙ	15
3.1 Принцип работы мембранного аппарата	15
3.2 Основные типы мембранных модулей	17
4 ОСНОВНЫЕ ТИПЫ АДСОРБЕРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА	22
5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ	26
6 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ	28
6.1 Расчет мембранного аппарата	28
6.2 Выбор адсорбента и адсорбера	29
6.3 Расчет адсорбера	30
6.3.1 Диаметр адсорбера	30
6.3.2 Высота слоя адсорбента	31
7 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МЕМБРАННОГО АППАРАТА	34
8 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ АДСОРБЕРА	36
9 ПРОВЕДЕНИЕ СИМУЛЯЦИИ ГАЗООЧИСТКИ В АДСОРБЕРЕ	39
9.1 Экспериментальная часть	39
9.2 Анализ полученных результатов	40
10 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА	46
10.1 Расчет зоны поражения взрыва природного газа	47
10.2 Методы защиты от поражения природным газом	49
11 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ	52

11.1 Выбор материала	52
11.2 Расчет затрат на изготовление мембранного аппарата	53
11.2.1 Расчет массы корпуса мембранного аппарата	53
11.2.2 Расчет затрат на изготовление	54
11.3 Расчет затрат на изготовление адсорбера	54
11.3.1 Расчет массы корпуса адсорбера	54
11.3.2 Расчет массы адсорбента	55
11.3.3 Расчет затрат на изготовление	55
11.4 Общие затраты на производство	55
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	59

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

Пермеат – это поток газа, который проходит через мембрану в процессе мембранного разделения;

Ретентат – это поток очищенного газа, который не проходит через мембрану в процессе мембранного разделения;

РН – ракета-носитель;

СПГ – сжиженный природный газ;

КЦА – короткоцикловая адсорбция;

ТВС – топливо-воздушная смесь;

НКПР – нижний концентрационный предел распространения пламени;

СИЗ – средства индивидуальной защиты.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность использования сжиженного природного газа в качестве ракетного топлива стремительно растет, и это обусловлено рядом преимуществ перед традиционными вариантами, такими как керосин и гептил. Вот некоторые ключевые аспекты:

– СПГ значительно дешевле керосина и гептила, что существенно снижает стоимость запусков. Это открывает возможности для более частых космических полетов;

– СПГ гораздо чище, чем керосин и особенно гептил. При сгорании он производит меньше сажи и вредных веществ, уменьшая негативное воздействие на окружающую среду. Основными продуктами сгорания являются вода и углекислый газ, хотя последний все еще вызывает опасения в контексте изменения климата. Тем не менее, по сравнению с другими видами топлива, СПГ представляет собой более "зеленую" альтернативу;

– СПГ хорошо подходит для многоразовых ракетных двигателей. Он не оставляет большого количества отложений в камере сгорания и топливных линиях, что упрощает обслуживание и подготовку к повторному запуску;

– Хотя плотность СПГ ниже, чем у керосина, она все еще достаточно высока, чтобы обеспечить приемлемые массогабаритные характеристики ракеты. Кроме того, СПГ можно использовать в сочетании с другими компонентами топлива, например, с жидким кислородом, что позволяет достичь еще большей эффективности;

– В сочетании с жидким кислородом, СПГ обеспечивает высокий удельный импульс (тягу, получаемую от единицы массы топлива), что позволяет ракете нести большую полезную нагрузку или достигать более высоких орбит;

– СПГ имеет очень низкую температуру замерзания, что делает его подходящим для использования в условиях космического холода;

– Хотя СПГ является горючим веществом, он менее токсичен и взрывоопасен, чем гептил, что повышает безопасность работы с ним.

Однако стоит вопрос о производстве качественного СПГ, с более высоким содержанием метана по сравнению с СПГ, применяемого для других видов транспорта.

В данной дипломной работе рассматривается вариант очистки метанового топлива (природного газа) от примесей непосредственно на космодроме. Очистка природного газа непосредственно на космодроме имеет ряд преимуществ. Одним из преимуществ является удешевление и упрощение транспортировки природного газа, осуществляемой при помощи трубопровода.

1 ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СПГ ДЛЯ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ

Сжиженный природный газ – это смесь углеводородов, основным компонентом является метан. В зависимости от содержания метана и других примесей, СПГ делится на три марки: А, Б и В.

Таблица 1 – Показатели качества СПГ согласно ГОСТ Р 56021-2014

Наименование показателя	Значение марки		
	А	Б	В
Область значений числа Воббе, МДж/м ³	От 47,2 до 49,2	Не норм.	От 41,2 до 54,5
Низшая теплота сгорания, МДж/м ³	Не норм.	От 31,8 до 36,8	Не норм.
Молярная доля метана, %, не менее	99,0	80,0	75,0
Молярная доля азота, %, не более	Не норм.	5,0	5,0
Молярная доля диоксида углерода, %, не более	0,005	0,015	0,030
Молярная доля кислорода, %, не более	0,020	0,020	0,020
Массовая концентрация сероводорода, г/м ³ , не более	0,020	0,020	0,020
Массовая концентрация меркаптановой серы, г/м ³ , не более	0,036	0,036	0,036
Расчетное октановое число, не менее	Не норм.	105	Не норм.

Согласно Техническим условиям «Газ горючий природный сжиженный».

Топливо для ракетной техники» к СПГ для ракетной техники применяются наиболее жесткие требования к показателям качества.

Таблица 2 – Показатели качества СПГ для ракетной техники

Показатель	ГОСТ Р 56021-2014	Показатель	ТУ 021 00180689-96
Молярная доля метана, %, не менее	99,0	Объемная доля метана, %	96,0
		Объемная доля этана, пропана, %	2,82
		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
Молярная доля диоксида углерода, %, не более	0,005	Объемная доля диоксида углерода, %	Не более 0,011
Молярная доля кислорода, %, не более	0,020		
Массовая концентрация сероводорода, г/м ³ , не более	0,020	Объемная доля сероводорода и серосодержащих (меркаптаны), %	Не более 0,001
Массовая концентрация меркаптановой серы, г/м ³ , не более	0,036		

Исходя из показателей таблицы 1, СПГ для ракетной техники должен соответствовать марке А по ГОСТ 56021-2014, т. е. требованиям наиболее высоким, чем для СПГ, используемого в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания, электроустановок и других видов транспорта.

Для получения такого качества топлива необходимо применять дополнительную очистку природного газа с применением технологии мембранно-адсорбционной очистки природного газа. Данную очистку наиболее выгодно производить непосредственно на космодроме перед заправкой в РН.

2 ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА ДЛЯ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ

Высококачественное производство СПГ требует строгой предварительной обработки газа для достижения высокой степени сжижения. Необходимо соблюдать следующие характеристики:

- Содержание CO_2 максимум 0,005% мол.
- Точка росы воды не выше -70°C .
- Общее содержание серы максимум 0,010 г/м³.
- Содержание кислорода обычно незначительно в сырьевом газе и не требует дополнительной очистки.

- Содержание метана и индекс Воббе для обеспечения молярной доли метана не менее 99,0% и более высокого диапазона индекса Воббе требуется корректировка состава природного газа.

Для достижения этих характеристик подходит комбинированный подход к предварительной обработке с использованием полупроницаемых мембран и адсорбции с переменным давлением.



Рисунок 1 – Схема очистки природного газа

Современные мембранные материалы демонстрируют повышенную селективность и стабильность при переработке углеводородных газов. Это достижение значительно расширяет применение мембранной технологии в очистке и подготовке природного газа, используя принципиально иной механизм

разделения. Эти мембраны демонстрируют минимальную проницаемость для метана по сравнению с другими углеводородами.

Первоначальное мембранное разделение удаляет водяной пар, углекислый газ, сероводород и более тяжелые углеводороды из исходного газа, перенося их в зону более низкого давления. Низкая проницаемость метана позволяет получать подготовленный газ при давлении всего на 2-3 атм ниже начального давления. Этот начальный этап обеспечивает предварительную очистку, осушку и корректировку углеводородного состава для достижения мольной доли метана $\geq 99,0\%$, что является критическим требованием для производства высококачественного СПГ.

Впоследствии газ проходит глубокую очистку и осушку в установке адсорбции с переменным давлением (КЦА), снижая содержание CO_2 и сернистых соединений до требуемых уровней и достигая точки росы $-70\text{ }^\circ\text{C}$. Основное преимущество КЦА заключается в его изотермических циклах адсорбции и десорбции, что значительно снижает потребление энергии во время регенерации адсорбента. Такая безнагревная регенерация делает КЦА энергоэффективным и прогрессивным методом глубокой очистки и сушки. Присущая процессу нечувствительность к изменениям состава исходного газа смягчается предшествующей стадией мембранного разделения. Эта предварительная обработка значительно снижает объем требуемых цеолитов и общий размер установки КЦА.

Таким образом, комбинированный мембранно-адсорбционный процесс обеспечивает эффективную предварительную обработку природного газа, включая корректировку состава углеводородов, что облегчает производство высококачественного СПГ, подходящего для таких применений, как ракетное топливо. [7]

3 ОСНОВНЫЕ ТИПЫ И ПРИНЦИП РАБОТЫ МЕМБРАННЫХ МОДУЛЕЙ

3.1 Принцип работы мембранного аппарата

Принцип работы мембранного аппарата для очистки природного газа основан на явлении селективного проникновения (проницаемости) различных компонентов газовой смеси через полупроницаемую мембрану под действием градиента давления.

В основе аппарата лежит мембрана – тонкий слой специального полимерного или неорганического материала. Эта мембрана обладает способностью пропускать одни молекулы газа легче, чем другие.

Различные газы имеют разную способность растворяться в материале мембраны и диффундировать через нее. Эта способность характеризуется коэффициентом проницаемости. Например, для мембран, используемых для очистки природного газа от CO_2 и H_2S , коэффициент проницаемости для этих "кислых" газов (и воды) значительно выше, чем для метана (CH_4) или азота (N_2).

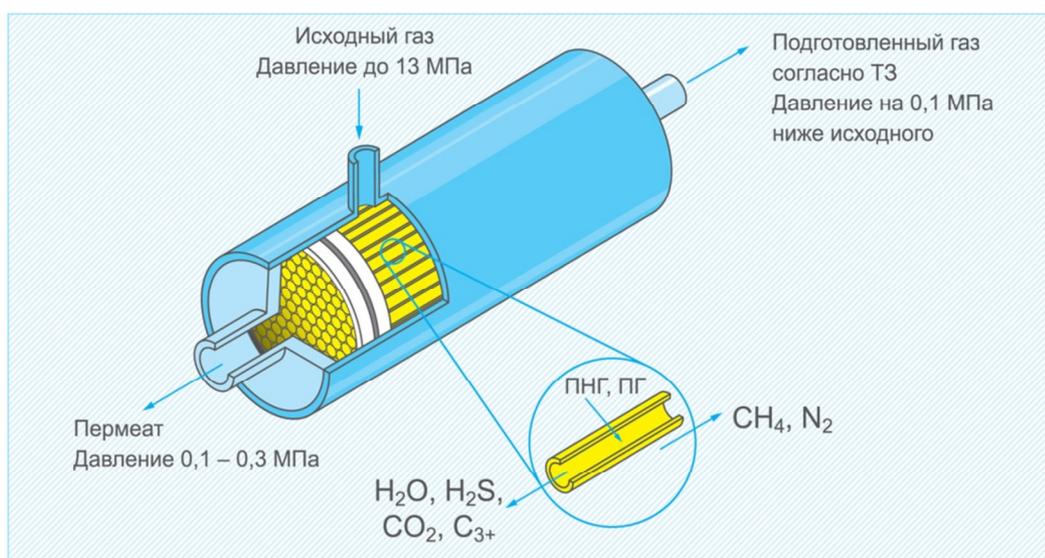


Рисунок 2 – Принцип работы мембранного аппарата

Для того чтобы газы начали движение через мембрану, необходимо создать движущую силу. В мембранных аппаратах для газов такой силой является разница парциальных давлений компонентов по разные стороны мембраны, которая обычно достигается за счет общего градиента давления:

1. На сторону подачи (сторона высокого давления) подается исходный (неочищенный) природный газ под давлением.

2. На стороне пермеата (сторона низкого давления) поддерживается более низкое давление (либо близкое к атмосферному, либо вакуум, либо просто более низкое, чем на стороне подачи).

Во время процесса разделения молекулы газов из исходной смеси сначала растворяются (абсорбируются) в материале мембраны на стороне высокого давления.

Затем они диффундируют через толщу мембраны под действием разницы концентраций (вызванной разницей давлений).

Наконец, они десорбируются с обратной стороны мембраны (стороны низкого давления).

Газы с более высоким коэффициентом проницаемости (например, CO_2 , H_2S , H_2O) проходят через мембрану быстрее и в большем количестве.

Газы с более низким коэффициентом проницаемости (например, CH_4 , N_2) проходят через мембрану медленнее и в меньшем количестве.

В результате этого процесса исходный газовый поток разделяется на два потока:

1. Пермеат – поток газа, который прошел через мембрану. Он обогащен компонентами с высокой проницаемостью (CO_2 , H_2S , H_2O). Давление этого потока низкое.

2. Ретентат или непермеат – поток газа, который не прошел через мембрану и движется вдоль ее поверхности. Он обогащен компонентами с низкой проницаемостью (CH_4 , N_2) и, следовательно, является очищенным или частично очищенным продуктом. Давление этого потока близко к давлению подачи, но несколько ниже из-за гидравлических потерь.

3.2 Основные типы мембранных модулей

Мембранная технология является одним из перспективных и широко используемых методов очистки природного газа. Она основана на селективном проникновении различных компонентов газовой смеси через полупроницаемую мембрану под действием градиента давления или концентрации. Эффективность процесса во многом зависит от правильного выбора типа мембранного модуля.

Вот основные типы мембранных модулей, применяемых для очистки природного газа:

1. Половолоконные модули – состоят из пучка тысяч очень тонких полых волокон (диаметром от долей миллиметра до нескольких миллиметров), заключенных в кожух. Исходный газ может подаваться либо внутрь волокон, либо на их внешнюю поверхность. Компоненты, проникающие через стенки волокон (пермеат), собираются с одной стороны, а не проникшие компоненты (ретентат или концентрат) – с другой.

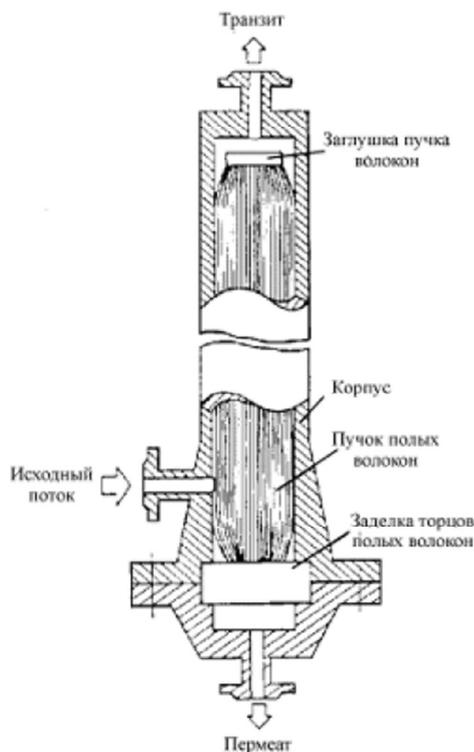


Рисунок 3 – Схема половолоконного модуля

Преимущества:

- Очень высокая удельная поверхность мембраны на единицу объема модуля – это обеспечивает высокую производительность и компактность установок;
- Способность работать при высоких давлениях, что важно для процессов очистки природного газа, который часто находится под давлением;
- Возможность организации противотока или прямотока для оптимизации процесса разделения;
- Относительно простая конструкция модуля.

Недостатки:

- Повышенная чувствительность к механическим загрязнениям. Тонкие каналы волокон могут легко засориться твердыми частицами или капельной жидкостью, что требует тщательной предварительной подготовки газа;
- Сложность равномерного распределения потока по всем волокнам.

Применение в очистке природного газа:

- Удаление кислых газов (CO_2 , H_2S);
- Осушка природного газа (удаление водяных паров);
- Извлечение гелия;
- Удаление азота.

Широко используются как на крупных газоперерабатывающих заводах, так и на морских платформах и небольших установках.

2. Рулонные (спирально-навитые) модули представляют собой пакет из нескольких слоев: мембраны, дренажного материала для отвода пермеата и сепарирующей сетки для создания канала для исходного потока. Этот пакет наматывается вокруг центральной перфорированной трубки, которая служит для сбора пермеата. Исходный газ движется вдоль поверхности мембраны в осевом направлении.

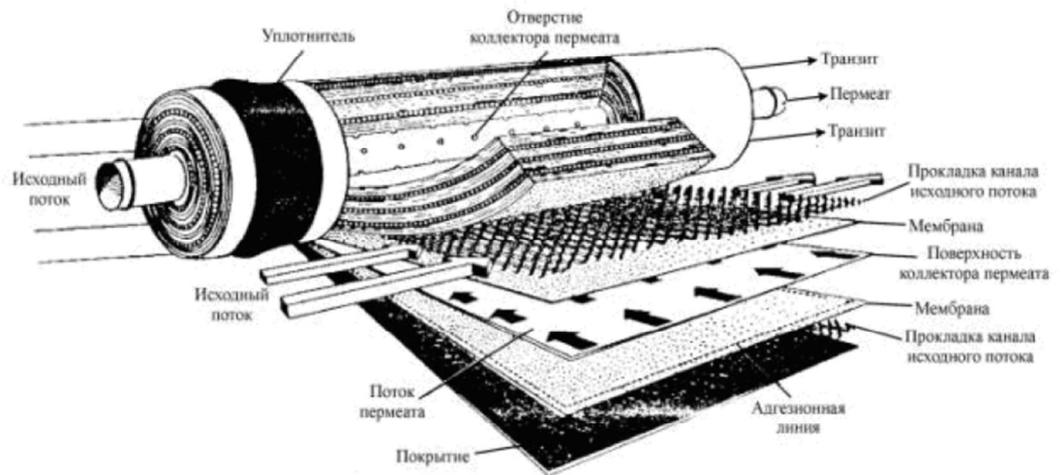


Рисунок 4 – Схема рулонного аппарата

Преимущества:

- Хорошая удельная поверхность мембраны, хотя и меньше, чем у полволоконных, но значительно выше, чем у пластинчато-рамных или трубчатых;
- Относительно низкая стоимость за счет стандартизации производства;
- Устойчивость к некоторому загрязнению. Каналы для потока сырья шире, чем в полволоконных модулях.

Недостатки:

- Сложность очистки. При сильном загрязнении их трудно или невозможно эффективно очистить;
- Концентрационная поляризация может снижать эффективность разделения;
- Ограничения по рабочему давлению по сравнению с полволоконными модулями.

Применение в очистке природного газа:

- Удаление CO_2 и H_2S ;
- Осушка газа;
- Удаление тяжелых углеводородов.

Подходят для установок средней и большой производительности.

3. Пластинчато-рамные модули состоят из набора плоских мембранных листов, разделенных опорными пластинами (прокладками), которые образуют каналы для подачи сырья и отвода пермеата и ретентата. Сборка напоминает фильтр-пресс.

Преимущества:

- Легкость очистки и замены мембран. Модуль можно разобрать;
- Хорошая гидродинамика позволяет работать с более вязкими или загрязненными потоками;
- Модульность конструкции, позволяющая легко изменять общую площадь мембран.

Недостатки:

- Низкая удельная поверхность мембраны, что приводит к большим габаритам установок;
- Высокая стоимость на единицу площади мембраны из-за большого количества деталей и уплотнений;
- Потенциальные проблемы с герметичностью уплотнений.

Применение в очистке природного газа:

Менее распространены для крупномасштабной очистки природного газа по сравнению с половолоконными и рулонными модулями из-за низкой компактности и высокой стоимости.

Могут использоваться для пилотных установок или в специфических случаях, где важна простота очистки.

4. Трубчатые модули – мембрана нанесена на внутреннюю или внешнюю поверхность пористой трубки (часто керамической или металлической) с диаметром от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Трубки собираются в пучки внутри кожуха.

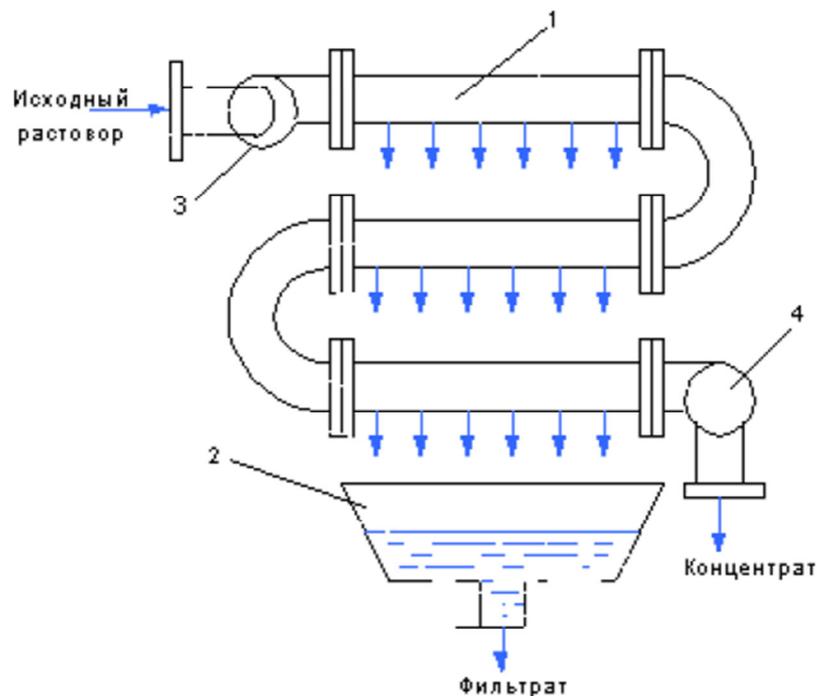


Рисунок 5 – Схема трубчатого аппарата

Преимущества:

- Очень высокая устойчивость к загрязнениям благодаря большим диаметрам каналов;
- Легкость механической очистки;
- Высокая механическая прочность.

Недостатки:

- Очень низкая удельная поверхность мембраны, самая низкая из всех типов;
- Высокая стоимость и большие габариты установки.

Применение в очистке природного газа:

Крайне редко используются для очистки природного газа из-за низкой эффективности упаковки мембраны и высокой стоимости. Их основное применение – обработка сильно загрязненных жидких потоков.

4 ОСНОВНЫЕ ТИПЫ АДСОРБЕРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Адсорбция – один из ключевых процессов в подготовке и очистке природного газа, позволяющий удалять нежелательные примеси, такие как вода, кислые газы (CO_2 , H_2S), ртуть, тяжелые углеводороды и другие. Выбор типа адсорбера зависит от множества факторов, включая состав газа, тип используемого адсорбента, требуемую производительность и условия эксплуатации.

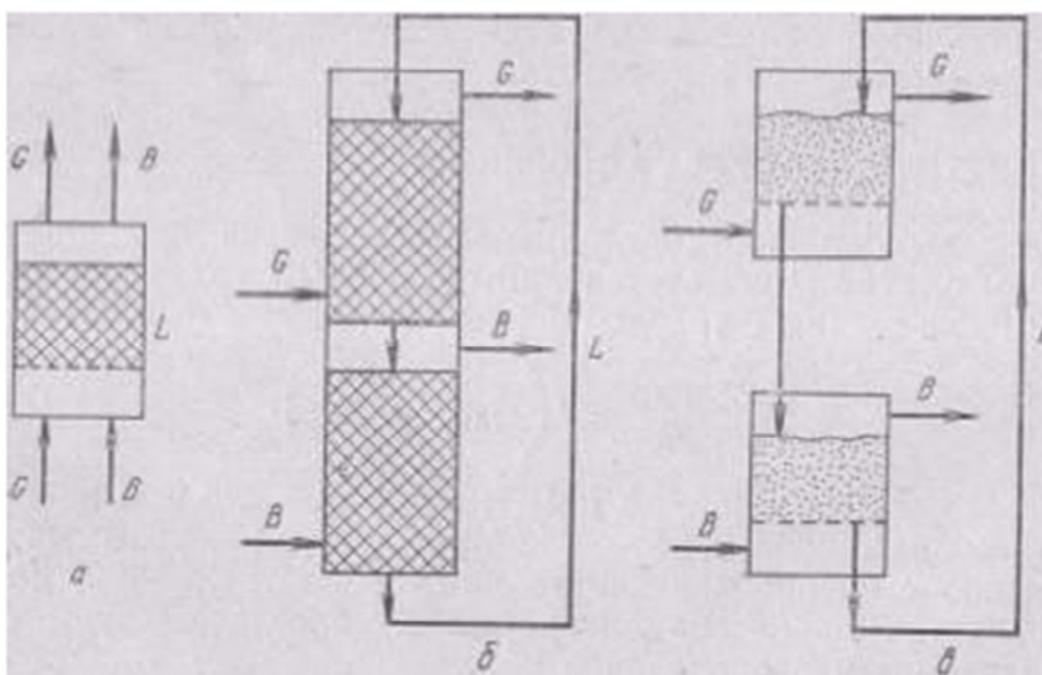


Рисунок 6 – Принципиальные схемы адсорберов

а – с неподвижным слоем; б – с подвижным слоем; в – с псевдооживленным адсорбентом.

Основные типы адсорберов, применяемых для очистки природного газа:

1. Адсорберы с неподвижным (стационарным) слоем адсорбента – это наиболее распространенный тип адсорберов в газовой промышленности. Газ проходит через неподвижный слой твердого адсорбента, где целевые компоненты поглощаются. Работают циклически: стадия адсорбции сменяется стади-

ей регенерации (десорбции) адсорбента. Для обеспечения непрерывности процесса обычно используют два или более параллельно работающих адсорбера (один в работе, другой на регенерации или в резерве).

а) Вертикальные цилиндрические адсорберы

– С нисходящим потоком газа. Газ подается сверху и проходит вниз через слой адсорбента. Это наиболее частая конфигурация, так как она обеспечивает равномерное распределение потока и предотвращает унос частиц адсорбента;

– С восходящим потоком газа. Газ подается снизу и проходит вверх. Может использоваться для предотвращения уплотнения слоя адсорбента или при определенных типах регенерации. Требуется тщательного контроля скорости потока, чтобы избежать псевдооживления или уноса адсорбента, если слой не прижат сверху.

– С радиальным потоком газа. Газ поступает в центральную перфорированную трубу, проходит радиально через кольцевой слой адсорбента и собирается у стенок аппарата (или наоборот). Такая конструкция позволяет снизить гидравлическое сопротивление слоя при больших объемах газа и использовать более мелкие гранулы адсорбента для повышения эффективности массопереноса.

б) Горизонтальные цилиндрические адсорберы

Применяются реже, обычно при больших расходах газа и ограничениях по высоте. Слой адсорбента располагается горизонтально. Могут иметь более сложную систему распределения газа для обеспечения равномерности потока.

в) Адсорберы со сферическим корпусом

Используются крайне редко для специфических задач, в основном при очень высоких давлениях, так как сферическая форма лучше выдерживает внутреннее давление.

Особенности адсорберов с неподвижным слоем:

- Простота конструкции и эксплуатации;
- Надежность;
- Возможность работы при высоких давлениях;

– Цикличность работы, требующая автоматизации переключения потоков и систем регенерации.

2. Адсорберы с движущимся слоем адсорбента. В этих системах адсорбент непрерывно или периодически перемещается через зону адсорбции, а затем в зону регенерации и обратно.

а) Адсорберы с гравитационным движением слоя (противоточные)

Адсорбент медленно движется сверху вниз под действием силы тяжести, а газ проходит противотоком (снизу вверх). Насыщенный адсорбент выводится снизу и направляется на регенерацию.

б) Адсорберы с псевдооживленным (кипящим) слоем

Газ проходит через слой адсорбента с такой скоростью, что частицы адсорбента находятся во взвешенном, интенсивно перемешиваемом состоянии. Это обеспечивает хороший массо- и теплообмен.

Особенности:

- Непрерывность процесса адсорбции и регенерации;
- Более эффективное использование адсорбента;
- Более сложная конструкция и управление;
- Проблема истирания и уноса адсорбента.

Чаще применяются для крупнотоннажных производств и специфических процессов (например, в каталитическом крекинге, но реже в стандартной очистке природного газа).

3. Адсорберы для процессов с короткоцикловой адсорбцией (КЦА). Хотя это скорее типы процессов, чем конструктивно обособленные адсорберы, аппараты для них имеют свои особенности. Обычно это батареи из нескольких (от 2 до 12 и более) адсорберов с неподвижным слоем, работающих в сложном, точно синхронизированном цикле коротких стадий адсорбции, сброса давления, продувки и нагнетания давления.

Особенности аппаратов для КЦА:

- Относительно небольшие размеры отдельных адсорберов (по сравнению с адсорберами для длительных циклов);

– Сложная система трубопроводов и быстродействующей запорно-регулирующей арматуры;

– Высокая степень автоматизации.

Часто используются для глубокой очистки, разделения газов (например, выделение азота, кислорода из воздуха, водорода из конвертированного газа, осушка, удаление CO₂).

5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ

Для наглядного представления процесса очистки и последовательности операций была разработана технологическая схема мембранно-адсорбционной очистки природного газа (Рисунок 7).

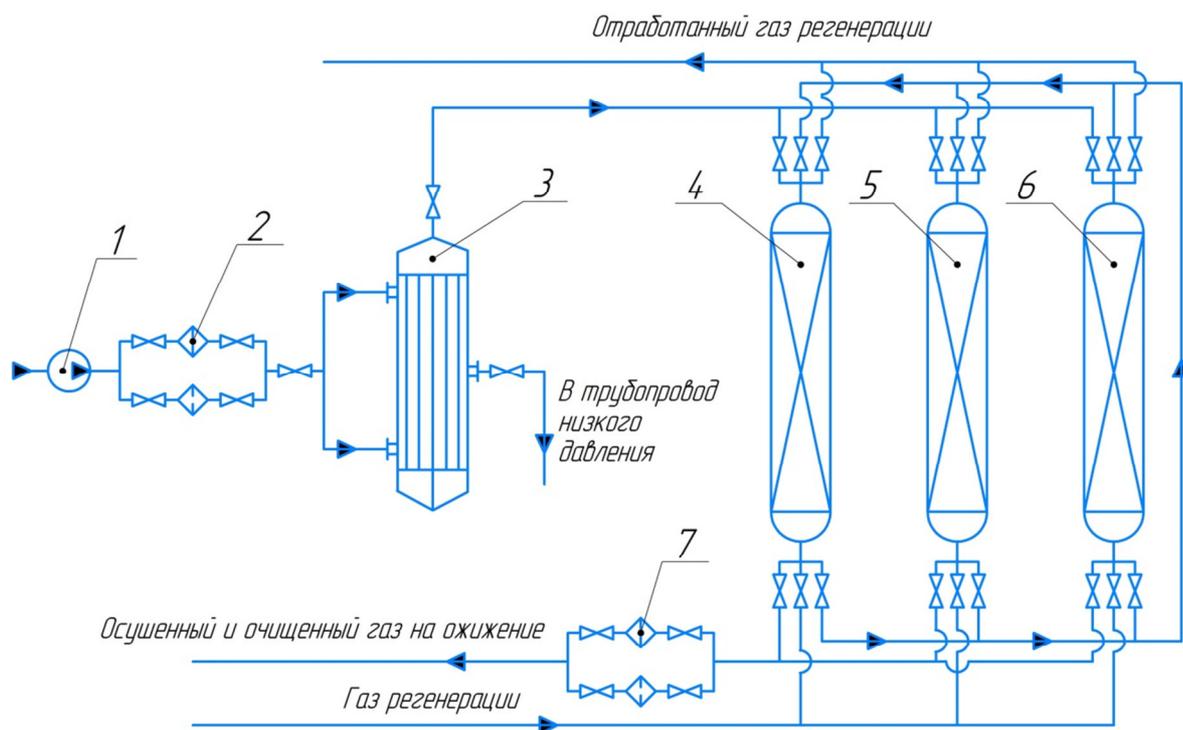


Рисунок 7 – Технологическая схема

Изначально из магистрального трубопровода при помощи насоса (1) под давлением 36 атм. и температуре 15 °С газ направляется в один из параллельно установленных фильтров механической очистки (2) для удаления из газа механических примесей. При этом из газа удаляются частицы размером более 5 мкм.

Далее газ направляется в мембранный блок (3), где происходит его осушка и очистка от примесей таких как углекислый газ, сероводород, пары воды и др. В мембранном модуле используют мембраны из пористого полимерного пленочного материала на основе фторопласта на подложке из нетканых матери-

алов (полипропилен, лавсан) с тонким разделительным слоем на основе кремнийорганических полимеров (мембрана марки Изогель) [5].

Пермеат (просочившийся газ) из мембранного модуля направляется в трубопровод низкого давления для его последующей утилизации.

Очищенный метан отправляется далее в блок адсорберов (4, 5, 6). Адсорберы заполнены адсорбентом – синтетическим цеолитом NaX.

Процесс адсорбции проходит последовательно в первом (4) и во втором (5) адсорберах.

При адсорбции происходит окончательная осушка и очистка газа от примесей. При этом достигается концентрация метана (CH₄) 99% и более.

Однако если после прохождения газа через блок адсорберов процент содержания примесей превышает допустимые нормы, второй адсорбер переводят в режим первого, а третий (6) в режим второго. Первый адсорбер (4) переходит в режим регенерации. И так последовательно происходит с каждым адсорбером, затем цикл повторяется.

Адсорбция проходит при температуре 20 °С и давлении 35 атм., а регенерация при температуре 20 °С и давлении 6 атм.

После блока адсорбции газ снова направляется в фильтр механической очистки (7) для удаления частиц адсорбента.

После газ направляется на ожижение, и затем в заправочную емкость.

6 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

6.1 Расчет мембранного аппарата

Расчет мембранного аппарата начинается с выбора типа мембраны и ее материала. В схеме очистки, описанной в данной работе наиболее выгодно использовать аппараты с мембраной из полого волокна. Материал – изоцианатный гидрофильный предполимер.

Критерий пригодности мембраны для разделения, т. е. задерживающая способность мембраны определяется по формуле:

$$R_{min} = \frac{\ln \frac{c_k}{c_n}}{\ln \frac{c_k - c_n}{c_n - c_n}} ; \quad (1)$$

где c_n – начальная концентрация газа;

c_k – конечная концентрация газа;

c_n – усредненная концентрация пермеата.

Далее определяется общий расход пермеата:

$$W_n = W_0 - W_k ; \quad (2)$$

где W_0 – расход газа на разделение;

W_k – расход концентрированного газа после разделения.

Расход концентрированного газа определяется по формуле:

$$W_k = 1 \cdot \left(\frac{c_k}{c_n} \right)^{\frac{1}{R}} ; \quad (3)$$

где c_n – начальная концентрация газа;

c_k – конечная концентрация газа;

R – задерживающая способность мембраны по целевому компоненту.

После определяется площадь мембран, необходимую для качественного разделения:

$$F_p = \frac{W_n}{G_{cp}}; \quad (4)$$

где G_{cp} – удельная производительность мембраны, которая определяется исходя из материала мембраны.

Таблица 3 – Результаты расчетов

R_{min}	$W_n, \text{ м}^3/\text{с}$	G_{cp}	$F_p, \text{ м}^2$
0,89	0,02	0,03	16

6.2 Выбор адсорбента и адсорбера

Адсорбенты – твердые нерастворимые тела, обладающие развитой поверхностью (до $1000 \text{ м}^2/\text{г}$) за счет высокой пористости.

В адсорберах для глубокой очистки и осушки природного газа от примесей в качестве адсорбента применяют цеолит NaX.

Таблица 4 – Параметры адсорбента NaX

Эффективный диаметр пор	9-10 мкм
Насыпная плотность	0,6 г/см ³
Размер гранулы	2,0-4,5 мм
Порозность слоя	0,33

В качестве конструкции аппарата выбираем адсорбер с неподвижным адсорбентом.

Эти устройства имеют простую конструкцию, обычно состоящую из цилиндрических резервуаров, вертикальных или горизонтальных, заполненных адсорбентом. Этот конкретный адсорбер представляет собой вертикальный цилиндрический резервуар. Распределительная решетка внизу поддерживает слой адсорбента. Входящая смесь поступает через трубу, протекает через адсорбент и выходит через другую трубу.

6.3 Расчет адсорбера

Цель расчета – определение основных размеров адсорбера (диаметра и высоты слоя сорбента), продолжительности стадий адсорбции и регенерации, числа адсорберов, при котором может быть обеспечена циклично-непрерывная работа всей установки.

В качестве исходных данных выступает таблица 4, а также расход природного газа необходимый для обеспечения системы заправки ракет-носителей $V = 0,4 \text{ м}^3/\text{с}$.

6.3.1 Диаметр адсорбера

Поперечное сечение адсорбера и, следовательно, его диаметр при проектировании аппарата цилиндрической формы определяются выбором фиктивной скорости газа. Верхним пределом скорости является скорость начала псевдооживления частиц сорбента. С увеличением скорости растет коэффициент массопередачи и увеличивается гидравлическое сопротивление. Допустимую фиктивную скорость можно рассчитать по формуле, полученной на основе технико-экономического анализа работы адсорберов:

$$\omega_0 = \sqrt{0,0167 \cdot \frac{\rho_{\text{нас}} \cdot d_3 \cdot g}{\rho_y}} ; \quad (5)$$

где d_3 – эквивалентный диаметр гранулы сорбента, м;

$\rho_{\text{нас}}$ – насыпная плотность сорбента, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ρ_y – плотность жидкости (газа), $\text{кг}/\text{м}^3$.

Диаметр аппарата:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot \omega}}. \quad (6)$$

6.3.2 Высота слоя адсорбента

Продолжительность T полного цикла в адсорбере с неподвижным слоем адсорбента (как и в любом адсорбере периодического действия) складывается из времени собственно адсорбции, времени десорбции, в течение которого через адсорбент продувают вытесняющий агент, и времени сушки и охлаждения адсорбента. Данные величины устанавливают опытным путем, а их сумма составляет продолжительность вспомогательных операций. Таким образом:

$$T = \tau + \tau_{всп}. \quad (7)$$

Для проведения адсорбции непрерывным способом применяют установки, состоящие из нескольких адсорберов периодического действия, в которых попеременно происходят адсорбция и вспомогательные операции (десорбция и сушка). В нашем случае используется три адсорбера, соединенных друг с другом последовательно. Для работы таких установок необходимо соблюдение условия:

$$\tau \geq \tau_{всп}. \quad (8)$$

Приблизительно продолжительность собственно процесса адсорбции можно определить исходя из средней емкости адсорбента:

$$\tau = \frac{L_{ср} \cdot m}{\omega_0 \cdot S \cdot \rho_{см} \cdot (c_1 - c_2)}; \quad (9)$$

где $L_{\text{сл}}$ – масса адсорбента в слое;

ω_0 – фиктивная скорость смеси, м/с;

S – площадь сечения адсорбера, м²;

$\rho_{\text{см}}$ – плотность смеси, кг/м³;

c_1 и c_2 – начальная и конечная концентрации адсорбтива в смеси.

Высота слоя адсорбента:

$$l_k = u \cdot (\tau + \tau_0); \quad (10)$$

где u – скорость движения фронта адсорбции;

τ_0 – потеря времени защитного действия.

Скорость движения фронта адсорбции u определяется по уравнению:

$$u = \omega_0 \cdot \frac{c_1}{\varepsilon \cdot c_0 + m}; \quad (11)$$

где c_1 – начальная концентрация вещества в исходном потоке;

ε – порозность слоя сорбента;

m – равновесная емкость сорбента.

Потерю времени защитного действия можно найти по следующей приближенной зависимости:

$$\tau_0 = 0,5 \cdot \frac{l_k}{u}. \quad (12)$$

Таблица 5 – результаты расчетов

ω_0 , м/с	D, мм	T, с	u, м/с	l_k , мм	τ_0 , с
8	758	600	7	1838	336

Исходя из результатов расчета подбираем стандартные размеры аппарата по ГОСТ 31834-2012 «Газоочистители адсорбционные».

Внутренний диаметр адсорбера принимаем $D = 800$ мм, а высоту слоя адсорбента принимаем $l_k = 2000$ мм.

7 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МЕМБРАННОГО АППАРАТА

По результатам расчета по пункту 6.1 подбираем размеры мембранных картриджей. Один стандартный картридж фирмы «Грасис» имеет мембраны площадью 2 м^2 , следовательно для данной установки необходимо 8 мембранных картриджей.

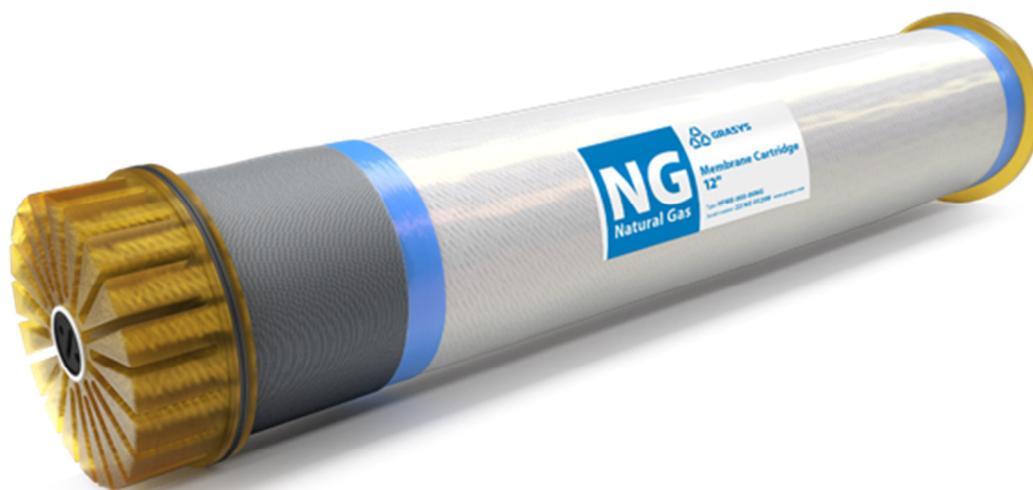


Рисунок 8 – Половолоконный картридж «Грасис»

Конструкция мембранного аппарата была разработана на основе патента RU 169226 [6].

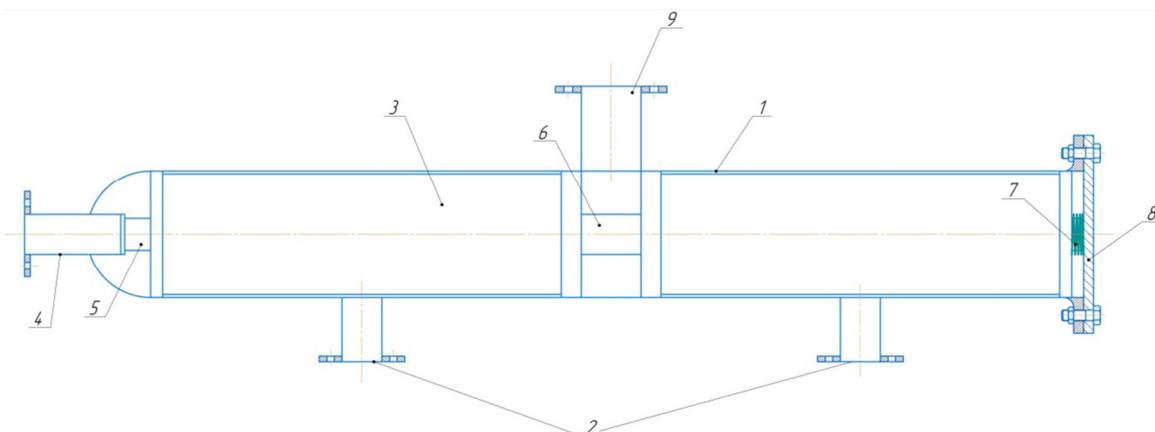


Рисунок 9 – Конструкция мембранного аппарата

В цилиндрический корпус (1) мембранного аппарата вставлены два половолоконных картриджа (3). Через картриджи проходит внутренняя коллекторная труба (5), которая соединена с трубопроводом (4). С другой стороны аппарата картриджи прижаты пружиной (7) и торцевой крышкой (8). Торцевая крышка присоединяется к корпусу с помощью болтов М27.

Для того чтобы газ из картриджей мог свободно выходить в трубопровод (9), между ними установлена прижимная муфта (6).

Данный мембранный аппарат работает следующим образом:

Через трубопроводы (2) природный газ под давлением поступает в аппарат.

Далее газ проходит очистку в картриджах (3) и разделяется на два потока. Не проникший через мембрану газ (метан) выходит через коллекторную трубу в трубопровод (4), проникший газ (пермеат) через проходные заливки картриджей выходит в трубопровод (9).

Герметичность между полостями сохраняется с помощью уплотнений торцевых заливок картриджей, а также благодаря разности давлений в данных полостях.

Входные трубопроводы (2) и выходной трубопровод (4) выполнены в виде труб диаметром 100 мм. А выходной трубопровод (9) – диаметром 150 мм.

Все соединения трубопроводов с магистральными выполнены в виде фланцев.

Корпус мембранного аппарата выполнен в виде цилиндра диаметром 320 мм, материал – нержавеющая сталь.

Данная конструкция мембранного аппарата предусматривает только два половолоконных картриджа, следовательно для нормального функционирования установки необходимо наличие четырех таких мембранных модулей в составе одного блока.

8 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ АДСОРБЕРА

На основе расчетов адсорбера определены габаритно-массовые характеристики и найдены соответствующие стандартные параметры аппарата в соответствии с ГОСТ31834-2012 «Газоочистители адсорбционные».

На основании полученных данных разработана конструкция адсорбера.

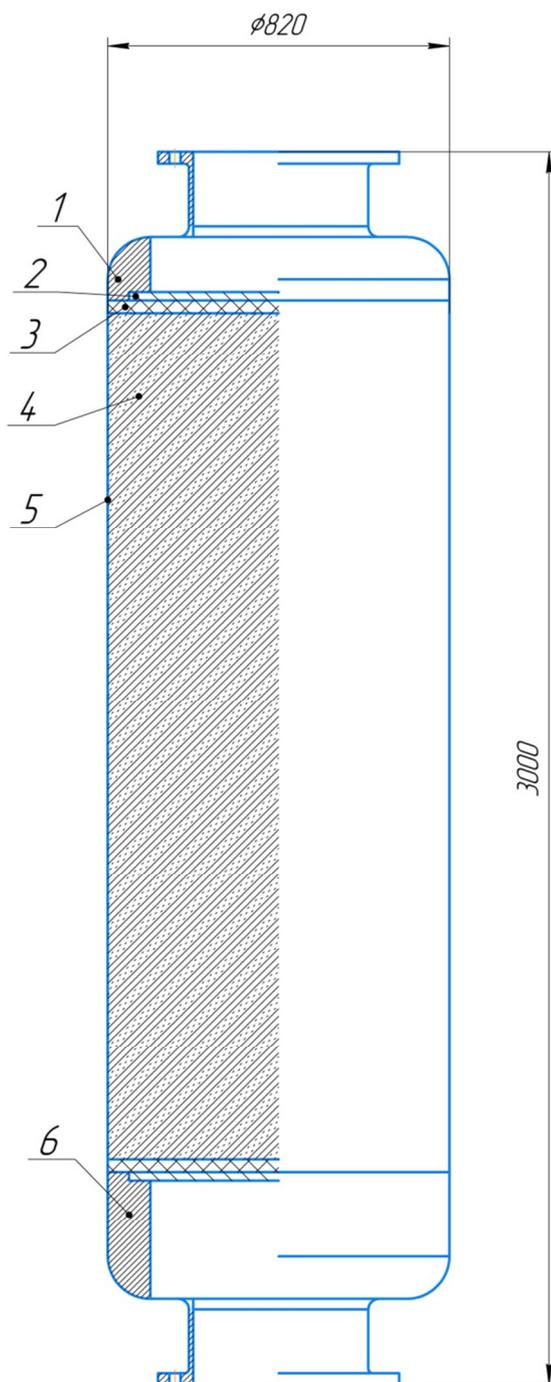


Рисунок 10 – Конструкция адсорбера

Конструкция адсорбера выполнена в виде цилиндрического резервуара, состоящего из центральной части корпуса (5), а также из верхней (1) и нижней (6) крышек.

Торцевые крышки имеют выходные патрубки, присоединяющиеся к магистральным трубопроводам при помощи фланцев. Сами патрубки закреплены на крышках при помощи кольцевой сварки.

Процесс сборки данного аппарата происходит следующим образом:

Для начала на нижнюю торцевую крышку укладывается и приваривается опорная решетка (3). Далее при помощи кольцевой сварки присоединяется центральный корпус (5).

Следующим шагом на дно полученного сосуда, т.е. на опорную решетку укладывается перфарированная сетка (3), которая удерживает адсорбент в сосуде и не дает ему просыпаться.

Сверху на перфарированную сетку засыпается гранулированный адсорбент NaX.



Рисунок 11 – Гранулированный синтетический цеолит NaX

Далее на адсорбент снова укладывается перфарированная сетка и прижимается верхней торцевой крышкой с приваренной к ней опорной решеткой.

Верхняя крышка также присоединяется к центральному корпусу при помощи кольцевой сварки.

Данный аппарат является неразборным, т. к. адсорбент очищается при помощи газа регенерации.

9 ПРОВЕДЕНИЕ СИМУЛЯЦИИ ГАЗООЧИСТКИ В АДСОРБЕРЕ

Моделирование процесса газоочистки нужно для определения эффективности очистки газа от примесей в зависимости от входной скорости. Также оно позволяет:

- Изучить процессы, происходящие на входе в аппарат, в нём и на выходе;
- Определить оптимальные входные параметры (термодинамические, такие как давление, температура, плотность; и параметры скорости в любых направлениях);
- Получить рабочие параметры оборудования для получения желаемого продукта на выходе из него;
- Предоставить рекомендации на производство по эффективным рабочим режимам оборудования или определить количество циклонов для достижения полной очистки газа.

Кроме того, моделирование помогает прогнозировать гидравлическое сопротивление аппарата и предсказать эффективность процесса сепарации на стадии проектирования.

9.1 Экспериментальная часть

Моделирование распределения потока газа в аппарате было проведено при помощи программы ANSYS.

Для проведения симуляции была построена модель рабочей области адсорбера без учета толщины стенок сосуда. Для построения сетки был использован встроенный пакет ANSYS ICEM CFD. Данный пакет позволил построить структуру адсорбента наиболее близкой к реальной.

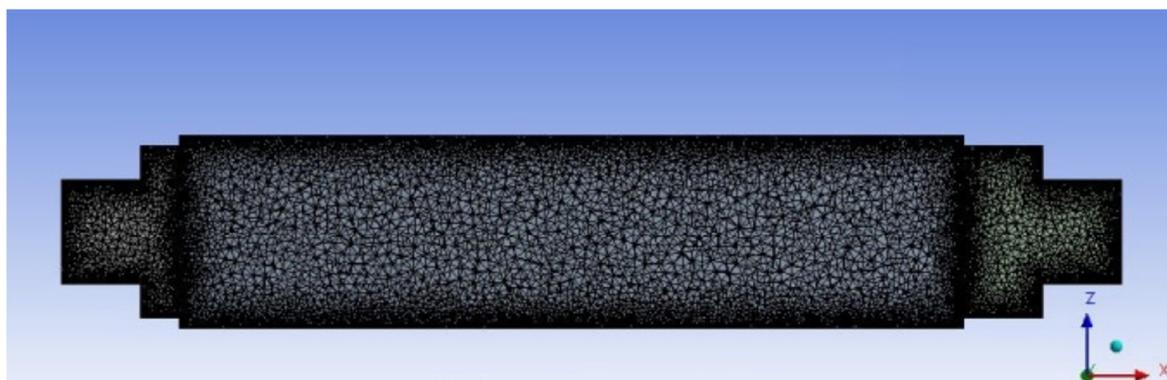


Рисунок 12 – Модель рабочей области адсорбера

Далее была проведена симуляция, параметры для ее проведения указаны в таблице. Симуляция проводилась при помощи пакета ANSYS Fluent.

Таблица 6 – Параметры для проведения симуляции

Подаваемый газ	Метан (CH ₄)
Скорость потока газа	7 м/с
Давление	101335 Па
Порозность слоя адсорбента	0,33

9.2 Анализ полученных результатов

Распределение давления газа в адсорбере изображено на рисунке 13.

Для удобства анализа и построения графика были проведены три линии А, Б и В.

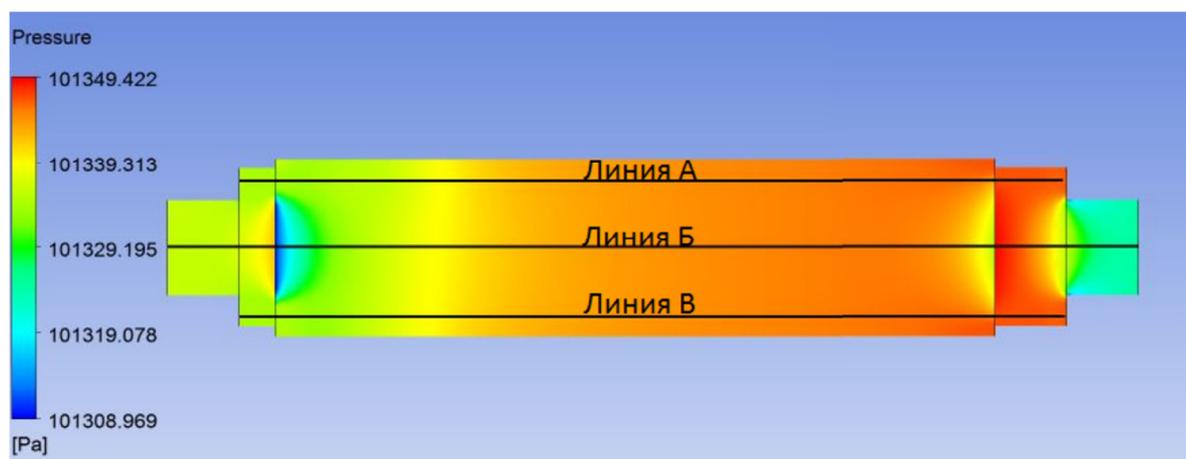


Рисунок 13 – Распределение давления газа

В центральной области по линии Б, где газ воздействует на поверхность адсорбента, образуется прямой скачок уплотнения, что приводит к одновременному повышению давления и существенному скачку скорости с 7 м/с до 11 м/с. Изменение давления носит иной характер в периферийных областях по линиям А и В.

Рисунок 14 показывает распределение скорости потока газа, выделяя три отдельные зоны А, В и С с различными направлениями потока.

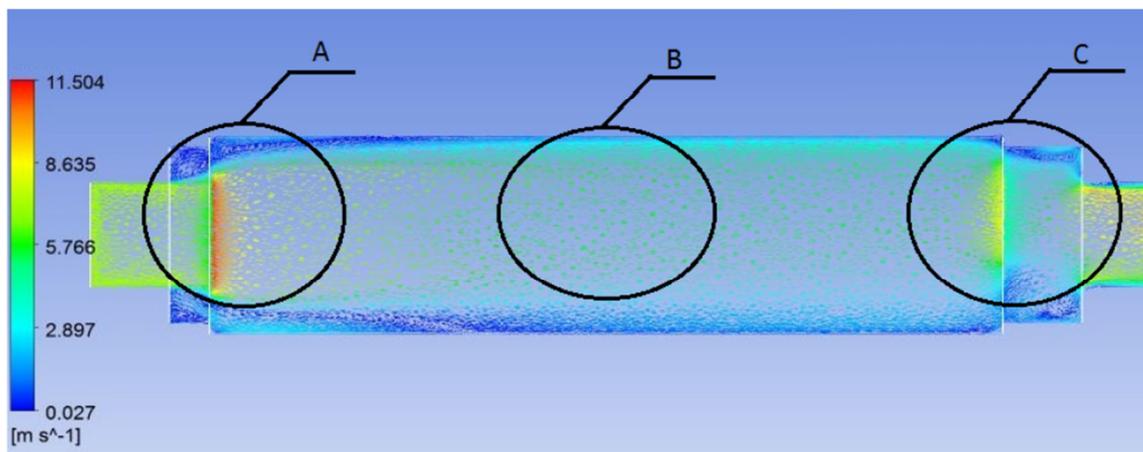


Рисунок 14 – Схема струи газа в слое адсорбента

Когда газ переходит из расширительной камеры в рабочую зону адсорбента через сплошную прямую стенку, представляющую границу слоя адсорбента, его направление меняется. Это смещение создает угловые вихревые зоны, как показано на рисунке 15.

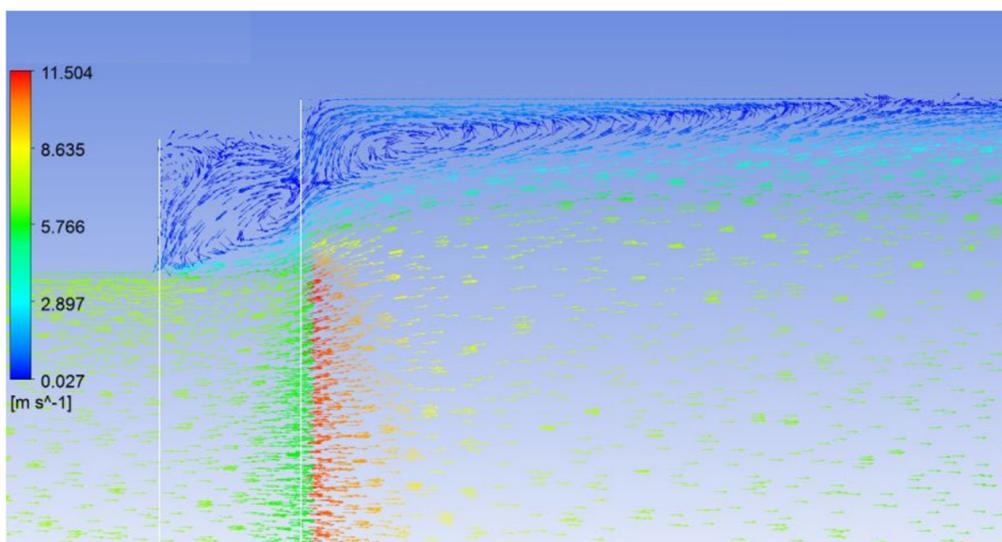


Рисунок 15 – Зона А

Затем поток возобновляет свое поступательное движение с уменьшенной скоростью. Эта переориентация завершается, когда струя, прилегающая к стенке, становится параллельной осевой линии и восстанавливает поступательный поток с меньшей скоростью (Рисунки 16 и 17).

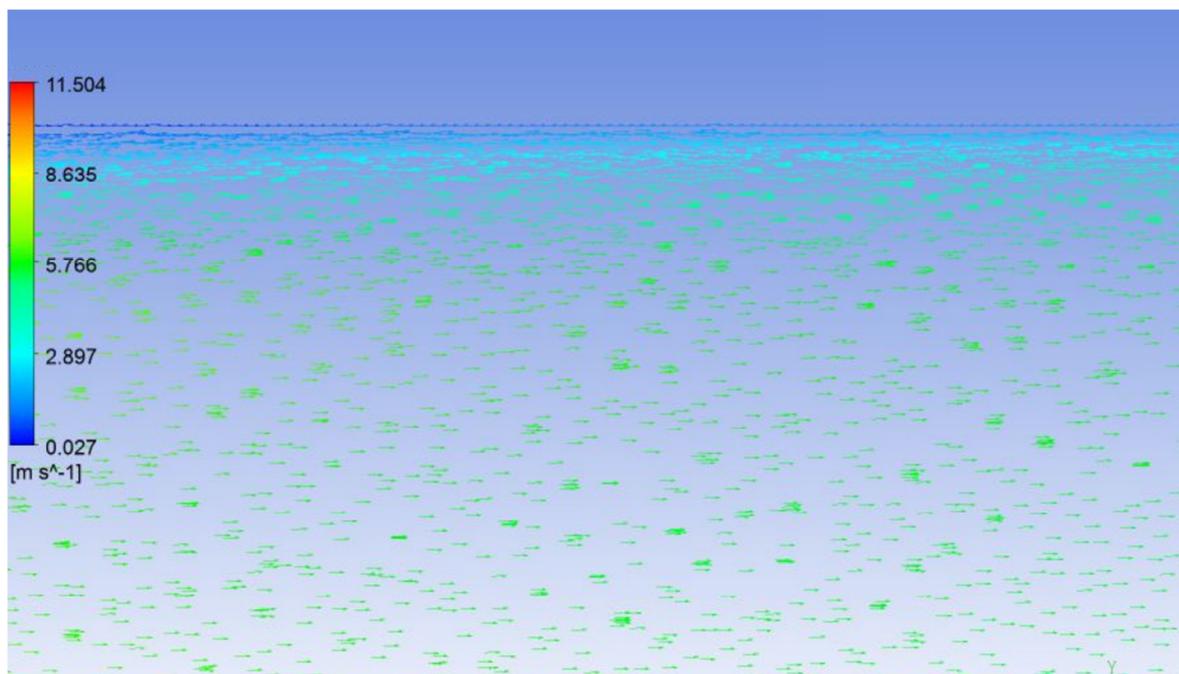


Рисунок 16 – Зона В

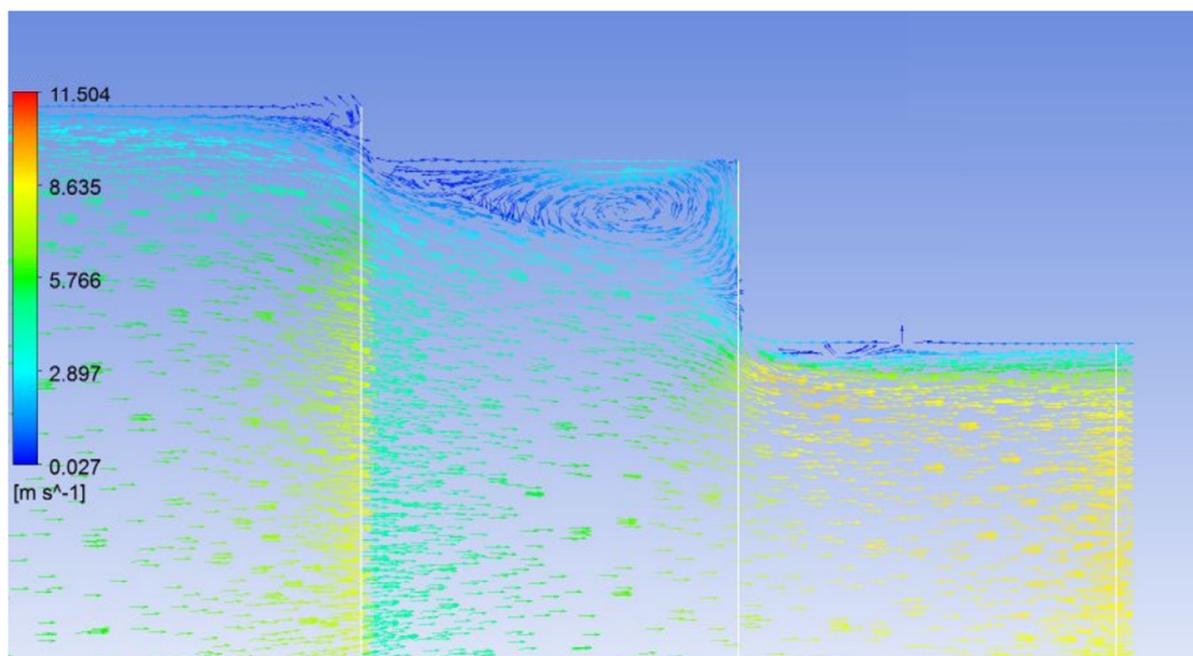


Рисунок 17 – Зона С

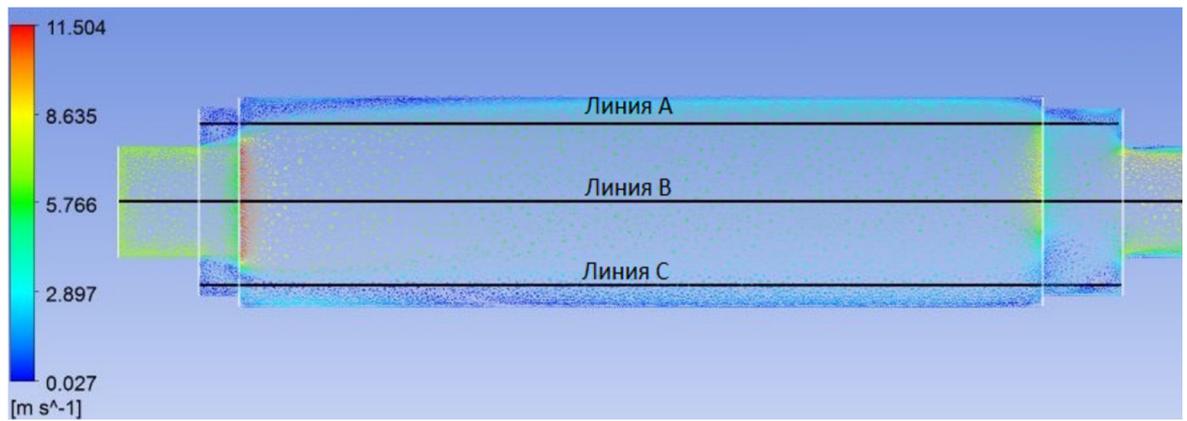


Рисунок 18 – Распределение скорости газа по линиям А, В и С

Также были построены графики распределения давления и скорости газа в адсорбере (Рисунки 19 и 20).

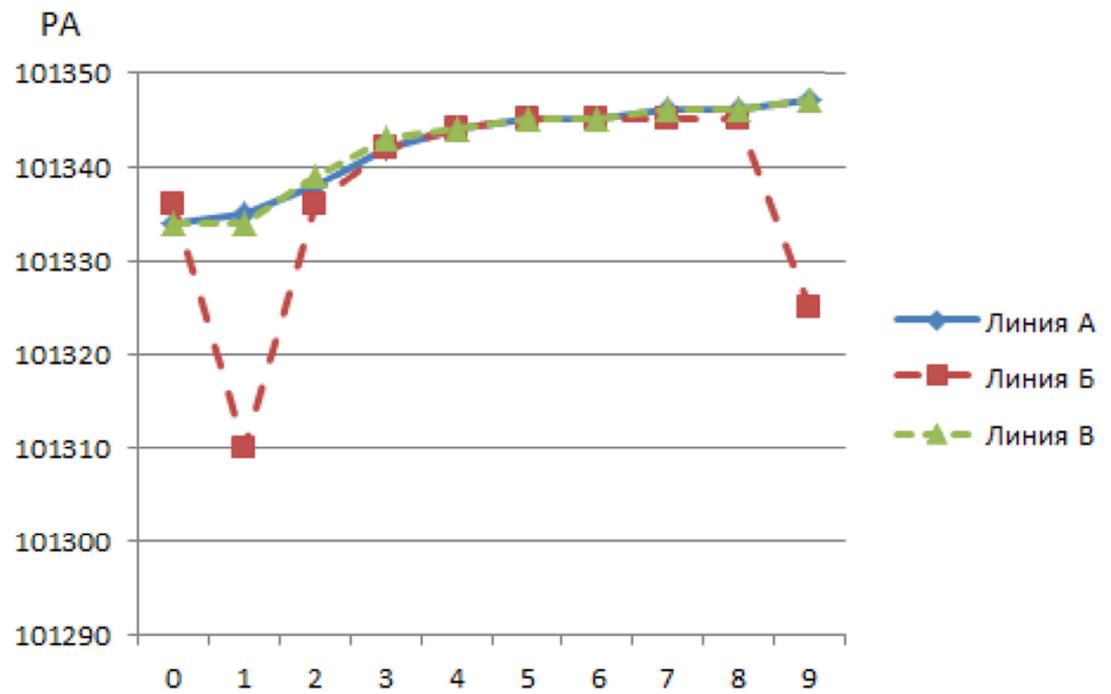


Рисунок 19 – График распределения газа

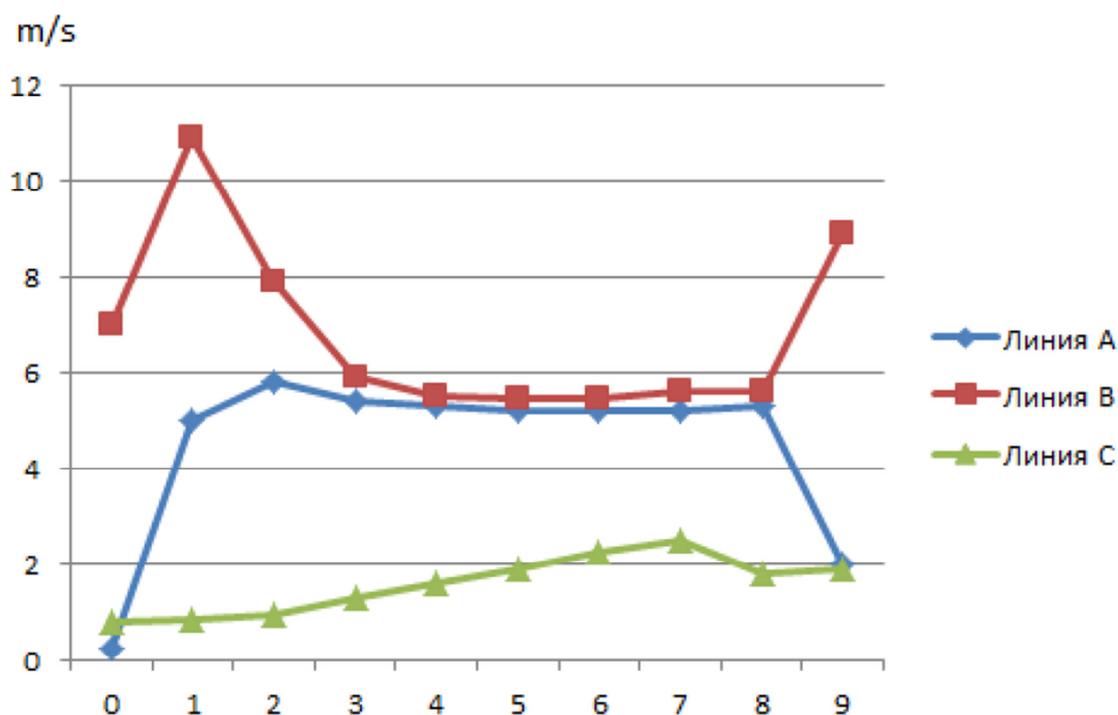


Рисунок 20 – График распределения скорости

Распределение газа в адсорбере, представленное на рисунке 21, демонстрирует наличие небольших застойных зон у входного периметра, но в целом газ равномерно заполняет пространство аппарата. Это свидетельствует об эффективности данной конструкции и обеспечивает быстрое заполнение камеры, и гарантирует равномерную работу адсорбента.

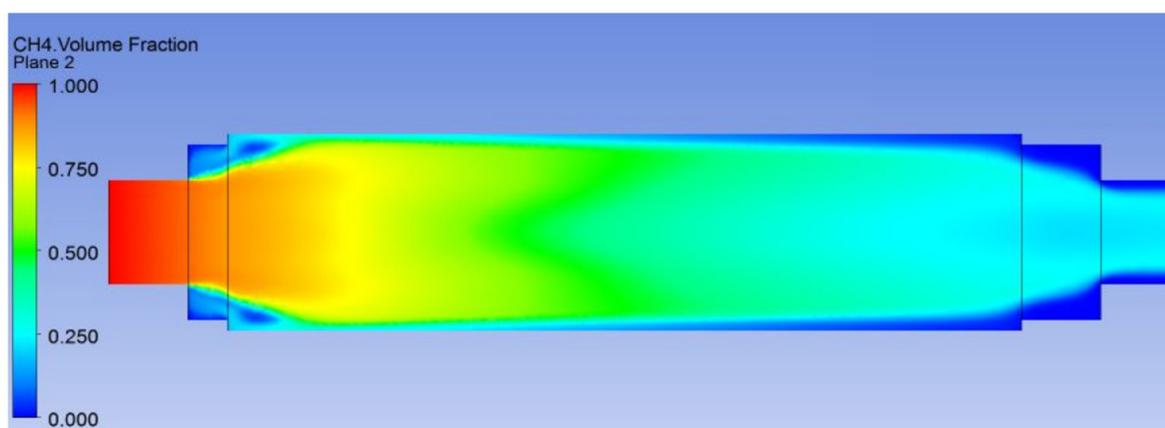


Рисунок 21 – Распределение газа в камере в начальный момент времени.

Таким образом исходя из данных, полученных в ходе симуляции можно сказать, что расчет и построение адсорбера выполнены правильно и аппарат

соответствует требованиям, представленным в ГОСТ 31834-2012 «Газоочистители адсорбционные».

10 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

Данная дипломная работа посвящена разработке системы очистки метанового топлива (природного газа) для заправки ракет-носителей.

При эксплуатации данной системы могут возникнуть различного рода опасности.

Среди множества опасностей можно выделить следующие:

– Взрыв природного газа. Может возникнуть вследствие утечки природного газа при разгерметизации систем находящихся под давлением.

– Воспламенение горючих веществ. Источниками могут являться искры, электрическое оборудование, перегрев оборудования, статическое электричество.

– Вдыхание токсичных паров газа. Возникает вследствие утечки природного газа.

– Контакт с агрессивными химическими веществами. Возникает при работе с растворителями, реагентами для очистки и обработки.

– Ударные травмы. Возникают при падении поднятых грузов, аварийного сброса давления и при выходе из строя оборудования.

– Электрический удар. Возникает при повреждении электропроводки, неправильном обращении с электрооборудованием, недостаточной изоляции.

Основным компонентом данной системы является природный газ.

По нормативам «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность» ГОСТ 12.1.004-91 по пожарной опасности природный газ относится к классу А.

По нормативам «Взрыво - и пожароопасные среды при проектировании электрических установок и силовых агрегатов» природный газ относится к II классу, категории В и группе Т4, II ВТ4.

Исходя из этого следует уделить внимание защите от взрыва природного газа на данном объекте.

10.1 Расчет зоны поражения взрыва природного газа

Взрыв природного газа приводит к материальному ущербу, а также является угрозой здоровью и жизни обслуживающего персонала.

Для того чтобы оценить масштабность последствий взрыва необходимо выполнить расчет взрывоопасной зоны и зоны поражения в соответствии с приказом Федеральной Службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 28.11.2022 № 412 «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливо-воздушных смесей».

Исходными данными для расчета служат физико-химические свойства природного газа согласно нормативам ТУ–ГАЗ–86.

Таблица 7 – Физико-химические свойства природного газа

Молярная масса, г/моль	Плотность кг/м ³	Плотность относительно воздуха	Пределы воспламенения			
			% об.		г/м ³	
			нижн.	верхн.	нижн.	верхн.
16,04	0,7166	0,5543	5,28	15	34,5	98

Радиус взрывоопасной зоны определяется по формуле:

$$X_{нкп\text{р}} = 14,6 \cdot \left(\frac{M_p}{\rho_n \cdot C_{нкп\text{р}}} \right)^{0,33}; \quad (13)$$

где $X_{нкп\text{р}}$ – расстояние по горизонтали от источника, ограниченное НКПР, м;

M_p – масса газа, поступившего в окружающее пространство (масса газа в облаке ТВС), кг;

$C_{нкп\text{р}}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени, % (об);

ρ_n – плотность газа, кг/м³.

Плотность газа рассчитывается по формуле:

$$\rho_n = \frac{M_m}{V_0 \cdot (1 + 0,0367 \cdot t_p)}; \quad (14)$$

где M_m – молекулярная масса вещества, кг/кмоль;

t_p – расчетная температура °С (согласно СНИП 2.01.01-82 «Строительная климатология и геофизика» для города Циолковский $t_p = 20,2$ °С);

V_0 – мольный объем, равный $22,413 \text{ м}^3$, кмоль⁻¹.

Масса газа в облаке ТВС определяется по формуле:

$$M_p = 0,34 \cdot M; \quad (15)$$

где M – масса газа в системе, т.

Далее, исходя из массы газа в облаке ТВС можно определить границы зон тяжелых поражений и порога поражений.

Граница зоны тяжелых поражений:

$$R_1 = 32 \cdot M_p^{\frac{1}{3}}. \quad (16)$$

Граница зоны порога поражений:

$$R_2 = 360 \cdot M_p^{\frac{1}{3}}. \quad (17)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 8 – Результаты расчетов зон поражений

$X_{\text{нкпр}}, \text{ м}$	$\rho_{\text{п}}, \text{ кг/м}^3$	$M_p, \text{ кг}$	$R_1, \text{ м}$	$R_2, \text{ м}$
7,9	0,41	0,34	22,3	251,3

Исходя из расчетов можно сделать вывод, что зона поражения взрыва природного газа является существенной в условиях космодрома.

В связи с этим необходимо обеспечить обслуживающий персонал средствами индивидуальной и коллективной защиты.

10.2 Методы защиты от поражения природным газом

Средства индивидуальной и коллективной защиты позволяют безопасно эксплуатировать данную систему, без угрозы здоровью и жизни обслуживающего персонала.

В соответствии с приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 29 октября 2021 г. № 767н «Об утверждении единых типовых норм выдачи средств индивидуальной защиты и смывающих средств» обслуживающий персонал необходимо обеспечить следующими СИЗ:

– Фильтрующие противогазы. Применяются при относительно невысоких концентрациях газа в воздухе. Важно подобрать правильный тип фильтра, предназначенный для защиты от природного газа (как правило, это фильтры маркировки "А" или многокомпонентные фильтры).

– Изолирующие противогазы или дыхательные аппараты. Используются в условиях высокой концентрации газа или недостатка кислорода в воздухе, например, при работе в замкнутых пространствах или при аварийных ситуациях. Они обеспечивают подачу чистого воздуха или кислорода независимо от состава окружающей атмосферы.

– Самоспасатели. Предназначены для экстренной эвакуации из зоны загазованности. Обеспечивают кратковременную защиту органов дыхания.

– Специальная одежда. Должна быть изготовлена из материалов, устойчивых к воздействию газа и не накапливающих статическое электричество. В зависимости от условий работы может включать в себя комбинезоны, куртки, брюки, халаты.

– Перчатки. Защищают руки от контакта с газом и обморожений (при работе со сжиженным природным газом). Материал перчаток должен быть совме-

стим с природным газом и обеспечивать достаточную защиту. При работе со сжиженным газом используются криогенные перчатки.

– Защитные очки или щитки. Предохраняют глаза от попадания газа, брызг и других механических повреждений. При работе со сжиженным газом используются специальные очки с защитой от брызг криогенной жидкости.

– Специальная обувь. В некоторых случаях может потребоваться специальная обувь, устойчивая к воздействию газа и обеспечивающая защиту от скольжения.

– Газоанализаторы. Портативные газоанализаторы позволяют контролировать концентрацию газа в воздухе и своевременно предупреждают об опасности.

– Средства связи. Обеспечивают связь между работниками и диспетчером в случае аварийной ситуации.

Также в соответствии с техническими условиями ТУ-ГАЗ-86 на установках, где существует угроза утечки газа необходимо устанавливать сигнализаторы и газоанализаторы контроля дозрывоопасных концентраций химических веществ.

При установке датчиков необходимо руководствоваться следующими правилами:

– Датчики сигнализаторов дозрывных концентраций устанавливаются только на той части площади открытой установки, где возможно оборудование с взрывопожароопасными продуктами;

– Ближайшие датчики не должны удаляться более чем на 6 м от внешнего периметра открытой установки в сторону расположения на ней оборудования, за исключением случаев, когда оборудование не имеет взрывоопасных продуктов, датчики каждого последующего ряда по отношению к предыдущему ряду датчиков должны быть сдвинуты на величину их радиуса обслуживания, т.е. расположены в шахматном порядке;

– Датчики сигнализаторов дозрывных концентраций следует устанавливать в местах наиболее вероятного выделения и скопления горючих паров и га-

зов, но во всех случаях радиус обслуживания одного датчика не должен превышать 10 м;

– Датчики сигнализаторов следует располагать на высоте 0,5+1 м от нулевой отметки;

– На сливо-наливных эстакадах следует устанавливать один датчик на две цистерны на нулевой отметке вдоль каждого фронта налива или слива.

Пример расположения сигнализаторов и газоанализаторов показан на рисунке 22, датчики обозначены черными точками.[12]

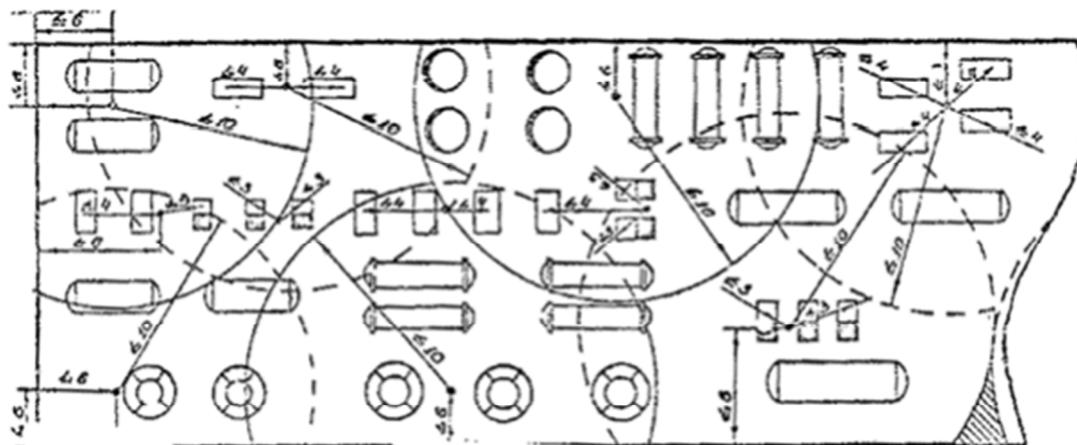


Рисунок 22 – Примерный порядок расположения датчиков сигнализаторов

11 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Цель экономического расчета – определение суммарных затрат на материалы для производства мембранных аппаратов и адсорберов.

11.1 Выбор материала

Согласно ГОСТ Р 52630-2012 «Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия» для изготовления корпусов аппаратов и труб, работающих в агрессивных средах необходимо применять нержавеющую сталь.

Для мембранного аппарата и адсорбера, рассматриваемых в данной работе в качестве материала выбрана нержавеющая сталь 08Х22Н6Т ГОСТ 5632-72.

Данная сталь обладает высокой прочностью и высокой стойкостью к коррозии. Максимальная рабочая температура обычно ограничивается примерно 250 – 300°С. Плотность составляет 7800 кг/м³.

Химический состав данной стали:

- Содержание углерода около 0.08% (низкоуглеродистая);
- Содержание хрома около 22% (обеспечивает коррозионную стойкость);
- Содержание никеля около 6% (способствует образованию аустенитной фазы, влияет на пластичность и коррозионную стойкость);
- Присутствие титана (титаном стабилизирована, предотвращает межкристаллитную коррозию).

Благодаря сочетанию высокой прочности, хорошей коррозионной стойкости (особенно к КРН) и свариваемости, сталь 08Х22Н6Т широко применяется в различных отраслях промышленности:

- Химическая и нефтехимическая промышленность;
- Нефтегазовая промышленность (оборудование для добычи, транспортировки и переработки "кислого" газа, морские платформы);
- Судостроение (конструкции, контактирующие с морской водой);
- Целлюлозно-бумажная промышленность;
- Энергетика;

- Пищевая промышленность;
- Изготовление аппаратов высокого давления (включая корпуса адсорбиров и сепараторов в газопереработке), трубопроводов, теплообменников, емкостей и других конструкций, работающих в агрессивных средах.

11.2 Расчет затрат на изготовление мембранного аппарата

11.2.1 Расчет массы корпуса мембранного аппарата

Масса корпуса мембранного аппарата рассчитывается исходя из его габаритных размеров по формуле:

$$m_{\text{корп}} = \pi \cdot \rho \cdot S \cdot (D - S) \cdot L ; \quad (18)$$

где ρ – плотность материала;

S – толщина стенки;

D – наружный диаметр корпуса;

L – длина корпуса.

Также по формуле 13 определяется масса внутренней коллекторной трубы ($m_{\text{тр}}$).

Масса выходных патрубков рассчитывается по формуле:

$$m_{\text{пат}} = \pi \cdot \rho \cdot S \cdot (D - S) \cdot L \cdot n ; \quad (19)$$

где ρ – плотность материала;

S – толщина стенки;

D – наружный диаметр;

L – длина корпуса;

n – количество патрубков.

Масса торцевой крышки определяется по формуле:

$$m_{\text{кр}} = \pi \cdot \rho \cdot (D^2 / 4) \cdot S ; \quad (20)$$

где ρ – плотность материала;

D – наружный диаметр;

S – толщина крышки.

Массы фланцев ($m_{фл}$) выходных патрубков определяются в соответствии с ГОСТ 33259-2015.

Таблица 9 – Результаты расчетов

$m_{корп}$, КГ	$m_{пат}$, КГ	$m_{кр}$, КГ	$m_{тр}$, КГ	$m_{фл}$, КГ
100	8,7	30	4,6	11

Общая же масса корпуса аппарата составляет:

$$M = m_{корп} + m_{пат} + m_{кр} + m_{тр} + m_{фл} = 154,3 \text{ кг} . \quad (21)$$

11.2.2 Расчет затрат на изготовление

Стоимость листовой нержавеющей стали 08Х22Н6Т составляет приблизительно 346 у.е. за килограмм. Тогда общая стоимость затрат на изготовление корпуса составит приблизительно 53500 у.е.

Также в данный мембранный модуль вставляются два полуволоконных картриджа. Один картридж фирмы «Грасис» стоит приблизительно 300000 у.е. Тогда общая стоимость составит 600000 у.е.

Итого стоимость производства одного мембранного модуля составит приблизительно 653000 у. е.

11.3 Расчет затрат на изготовление адсорбера

11.3.1 Расчет массы корпуса адсорбера

Масса цилиндрического корпуса адсорбера определяется также по формуле 13.

Массы выходных патрубков определяются по формуле 14.

Массы опорных решеток рассчитываются по формуле 15,

Также массы фланцев находятся по ГОСТ 33259-2015.

Таблица 10 – Результаты расчетов

$m_{\text{корп}}, \text{ кг}$	$m_{\text{пат}}, \text{ кг}$	$m_{\text{реш}}, \text{ кг}$	$m_{\text{фл}}, \text{ кг}$
655	35	60	34

Общая масса корпуса адсорбера составляет:

$$M = m_{\text{корп}} + m_{\text{пат}} + m_{\text{реш}} + m_{\text{фл}} = 784 \text{ кг} . \quad (22)$$

11.3.2 Расчет массы адсорбента

Масса адсорбента определяется исходя из высоты его насыпного слоя l_k и внутреннего диаметра D адсорбера.

Насыпная плотность адсорбента цеолита NaX составляет $\rho = 600 \text{ кг/м}^3$.

Тогда масса адсорбента рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{адс}} = \pi \cdot \left(\frac{D^2}{4} \right) \cdot l_k \cdot \rho = 603 \text{ кг} . \quad (23)$$

11.3.3 Расчет затрат на изготовление

Общие затраты на изготовление стального корпуса адсорбера составят примерно 272000 у.е. (из расчета 346 у.е. за килограмм).

Стоимость одного килограмма синтетического цеолита NaX составляет 483 у.е. Тогда общая стоимость адсорбента составит приблизительно 292000 у.е.

Тогда стоимость производства одного адсорбера составит примерно 564000 у.е.

11.4 Общие затраты на производство

Для системы очистки природного газа, разработанной в данной работе необходимо наличие мембранных аппаратов в количестве четырех штук и адсорберов в количестве трех штук.

Тогда общие затраты на одну установку без учета магистральных трубопроводов и трубной арматуры составят приблизительно 4304000 у.е.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были проанализированы характеристики и физико-химические показатели СПГ для ракетной техники. Было выяснено, что данные показатели существенно превышают требования к топливу в отличие от СПГ для двигателей внутреннего сгорания и электроустановок.

Была подобрана технология очистки метанового топлива (природного газа), которая позволяет добиться требуемых показателей качества топлива. Также было выяснено что данную технологию допустимо применять непосредственно на космодроме перед заправкой топлива в РН.

Также был проведен сравнительный анализ оборудования очистки природного газа и подобрано оптимальное по характеристикам в соответствии с выбранной технологией.

Была разработана технологическая схема очистки метанового топлива непосредственно на космодроме и выполнен чертеж данной схемы в соответствии со стандартами.

Выполнены расчеты мембранного аппарата и адсорбера и в соответствии с ними были определены габаритные размеры оборудования. В соответствии с найденными габаритными размерами разработаны конструкции мембранного аппарата по патенту RU 169226 и адсорбера в соответствии с ГОСТ 31834-2012 «Газоочистители адсорбционные». Разработаны сборочные чертежи данных аппаратов.

Далее была проведена симуляция прохождения газового потока через адсорбер. В ходе симуляции было выяснено, что конструкция адсорбера рассчитана правильно так как газ равномерно проходит через всю площадь сечения адсорбента.

Была проведена оценка безопасности использования метанового топлива, рассмотрены основные опасные факторы, которые могут возникнуть при рабо-

те данной системы, рассчитана зона поражения взрыва природного газа, рассмотрены средства индивидуальной и коллективной защиты обслуживающего персонала, разработан план безопасной эксплуатации системы.

В экономической части были рассчитаны затраты на производство необходимого оборудования по отдельности и в целом. В итоге общие затраты на изготовление мембранных аппаратов и адсорберов составили приблизительно 4304000 у.е.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Основы проектирования производств, использующих мембранное разделение: учебное пособие./ А.А. Свитцов. – М. РХТУ им. Менделеева, 2013. – 219с.

2 Моделирование процесса газоочистки в фильтре проточного типа с нерегулярной насадкой / А. А. Пермяков, Т. А. Енейкина, З. К. Омаров, Р. Ф. Гатина // Бутлеровские сообщения. – 2015. – Т. 41, № 2. – С. 76-81. – EDN TVPTUZ.

3 ГОСТ 31834-2012 «Газоочистители адсорбционные» – М.: Стандартинформ, 2012, 11 с.

4 Карпов, А. Б. Перспективы использования сжиженного природного газа в качестве топлива ракетных двигателей / А. Б. Карпов // Химия и химическая технология: достижения и перспективы : Материалы IV Всероссийской конференции, Кемерово, 27–28 ноября 2018 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2018. – С. 4081-4083. – EDN PISBFC.

5 Пат. 2659870 Российская Федерация, МПК F25J 3/08, F25J 3/0214. Способ производства сжиженного природного газа / А. М. Козлов, А. Б. Карпов, О. А. Швыдко ; Публичное акционерное общество «Газпром». – № 2017130854 ; Заявл. 31.08.2017 ; Оpubл. 04.07.2018, Бюл: № 19.

6 Пат. 169226 Российская Федерация, МПК B01D 63/02. Устройство для мембранного разделения газовых смесей / Л. Ф. Шестиперстов. – № 2016106093 ; Заявл. 24.02.2016 ; Оpubл. 13.03.2017.

7 Кондратенко, А. Д. Разработка комбинированного способа предварительной подготовки природного газа перед сжижением / А. Д. Кондратенко, А. Б. Карпов, А. М. Козлов // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке : Материалы VIII Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 15–17 ноября 2017 года. – Санкт-Петербург: Санкт-

Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017. – С. 132-134. – EDN XRSPHN.

8 ГОСТ 12.1.004-91 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования» – утв. постановлением Госстандарта СССР от 14 июня 1991 г. №875.

9 ГОСТ Р 56021–2014. «Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия» – М.: Стандартинформ, 2014, 15 с.

10 ГОСТ Р 52630-2012 «Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия» – М.: Стандартинформ, 2013, 128 с.

11 ГОСТ 33259-2015 «Фланцы арматуры, соединительных частей и трубопроводов на номинальное давление до PN 250» – М.: Стандартинформ, 2016, 107 с.

12 ТУ–ГАЗ–86 «Требования к установке сигнализаторов и газоанализаторов» – Москва, 1986, 13 с.

13 СНИП 2.01.01-82 «Строительная климатология и геофизика» – Москва, 1983, 139 с.