

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 химии и химической технологии
Направление подготовки 18.03.01 – Химическая технология
Направленность (профиль) образовательной программы Химическая
технология природных энергоносителей и углеродных материалов
ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Зав. кафедрой
_____ Ю.А. Гужель
«_____» _____ 202_ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Анализ методов получения азота на примере Амурского газоперерабатывающего завода

Исполнитель
студент группы 1107-об

(подпись, дата)

Сергеева А.В.

Руководитель
доцент, канд. техн. наук

(подпись, дата)

Гужель Ю.А.

Консультант по
безопасности
жизнедеятельности
доцент, канд. техн. наук

(подпись, дата)

Козырь А.В.

Нормоконтроль
проф., док. хим. наук

(подпись, дата)

Родина Т.А.

Благовещенск 2025

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 Химии и химической технологии

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой
_____ Ю.А. Гужель
« ____ » _____ 20__ г.

З А Д А Н И Е

К выпускной квалификационной работе студента Сергеевой Анастасии Владимировны

1. Тема выпускной квалификационной работы: «Анализ методов получения азота на примере Амурского газоперерабатывающего завода» утверждена Приказом от 03.04.2025 г № 878-уч.
2. Срок сдачи студентом законченной работы 19.06.2025 г.
3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: Сырье процесса получения азота – атмосферный воздух, расход – 49089 кг/ч. Готовая продукция – очищенный азот низкого, среднего и высокого давления. Параметры главной ректификационной колонны: количество тарелок – 46; рабочее давление – не выше 0,87 МПа; рабочая температура – от минус 165,55 °С до минус 170,6 °С. Параметры вспомогательной колонны: количество тарелок – 32; рабочее давление в колонне – не выше 0,3 МПа; рабочая температура – не выше минус 177,1 °С. Литературные данные. Технологическая документация, нормативная и иная документация.
4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): Литературный обзор по анализу промышленных методов получения азота. Характеристика сырья и готовой продукции. Описание технологических схем получения азота различными методами. Технико-экономическое обоснование выбора метода получения азота. Безопасность и экологичность производства.
5. Перечень материалов графической части: Технологические схема процессов получения азота.
6. Консультанты по выпускной квалификационной работе Козырь А.В., канд. техн. наук, доцент – раздел «Безопасность и экологичность производства».
7. Дата выдачи задания 18.04.2025 г.

Руководитель выпускной квалификационной работы: Гужель Юлия Александровна, канд. техн. наук, доцент

Задание принял к исполнению 18.04.2025 г.

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 68 с., 18 рисунков, 14 таблиц, 45 источников.

АЗОТ, УСТАНОВКА ПОЛУЧЕНИЯ АЗОТА, КРИОГЕННЫЙ МЕТОД, МЕМБРАННЫЙ МЕТОД, АДСОРБЦИОННЫЙ МЕТОД, АМУРСКИЙ ГАЗО-ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИЙ ЗАВОД, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Азот играет важную роль в газопереработке и применяется во многих технологических процессах. Целью выпускной квалификационной работы является сравнительный анализ методов получения азота на примере Амурского газоперерабатывающего завода.

В работе выполнен анализ научно-технической литературы по вопросам получения азота. Изучены процессы криогенного, мембранного и адсорбционного методов получения азота из атмосферного воздуха.

В технологической части выполнено компьютерное моделирование мембранной и криогенной систем генерации азота. Для объективной оценки методов дополнительно выполнен технико-экономический расчет, учитывающий себестоимость и эффективность процессов.

Исследованы риски, связанные с эксплуатацией криогенной установки: определен перечень ключевых опасностей и предложены меры по их минимизации.

Графическая часть содержит чертежи технологических схем мембранной и криогенной азотных установок, а также схему получения азота высокого, среднего и низкого давления.

					ВКР.245947.180301.ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					
Разраб.		Сергеева А.В.			Анализ методов получения азота на примере Амурского газоперерабатывающего завода				
Провер.		Гужель Ю.А.							
Реценз.									
Н. Контр.		Родина Т.А.							
Утверд.		Гужель Ю.А.							
					Лит.	Лист	Листов		
					у	3	68		
					АмГУ ИКиИН 1107-об гр.				

СОДЕРЖАНИЕ

Введение		6
1 Литературный обзор		7
1.1 Описание Амурского газоперерабатывающего завода		7
1.1.1 Блок-схема завода		8
1.1.2 Характеристика сырьевого газа и готовой продукции		10
1.2 Общие сведения об азоте		13
1.2.1 Содержание азота в природе		13
1.2.2 Характеристика азота		13
1.2.3 Роль азота в газопереработке и его применение		13
1.3 Анализ методов получения азота		14
1.3.1 Криогенный метод		15
1.3.1.1 Сущность метода		15
1.3.1.2 Эффект Джоуля-Томсона		16
1.3.1.3 Способы получения глубокого холода		17
1.3.1.4 Схема криогенной азотной установки		19
1.3.1.5 Преимущества и недостатки метода		21
1.3.2 Мембранный метод		22
1.3.2.1 Виды мембран		23
1.3.2.2 Принцип работы мембраны		24
1.3.2.3 Схема мембранной азотной установки		24
1.3.2.4 Преимущества и недостатки метода		26
1.3.3 Адсорбционный метод		26
1.3.3.1 Сущность метода		27
1.3.3.2 Схема адсорбционной азотной установки		28

					ВКР.245947.180301.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Сергеева А.В.			Анализ методов получения азота на примере Амурского газоперерабатывающего завода	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Гужель Ю.А.				у	4	68
Реценз.						АмГУ ИКиИН 1107-об гр.		
Н. Контр.		Родина Т.А.						
Утверд.		Гужель Ю.А.						

1.3.3.3	Преимущества и недостатки метода	29
2	Технологическая часть	30
2.1	Характеристика сырья и готовой продукции	30
2.2	Описание технологической схемы криогенной установки	31
2.3	Описание технологической схемы получения азота высокого, среднего и низкого давления	36
2.4	Описание технологической схемы мембранной установки	38
2.5	Моделирование и расчет криогенной и мембранной установок	42
3	Технико-экономическое обоснование выбора метода получения азота	48
3.1	Оценка капитальных затрат	48
3.2	Оценка эксплуатационных затрат	49
3.3	Расчет экономической эффективности проекта криогенной азотной установки	51
3.4	Расчет экономической эффективности проекта мембранной азотной установки	55
4	Безопасность и экологичность производства	57
4.1	Основные опасные производственные факторы на криогенной азотной установке	57
4.2	Коллективные и индивидуальные средства защиты при эксплуатации установки	60
	Заключение	63
	Библиографический список	64

ВВЕДЕНИЕ

Газовая промышленность является ключевым элементом глобальной энергетической системы, а рост объемов добычи и переработки природного газа диктует необходимость совершенствования вспомогательных технологий, включая производство технических газов. Одним из таких критически важных компонентов является азот, используемый для инертизации оборудования, продувки трубопроводов, обеспечения пожарной безопасности и поддержания технологических процессов на газоперерабатывающих заводах (ГПЗ).

Цель выпускной квалификационной работы – провести сравнительный анализ методов получения азота на примере Амурского газоперерабатывающего завода, оценить их экономическую и технологическую эффективность.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1. Провести подбор технической документации, научной литературы по теме работы и проанализировать существующие методы получения азота.
2. Изучить характеристику сырья и готовой продукции, а также технологическую схему получения азота на Амурском ГПЗ.
3. Выполнить моделирование и технико-экономический расчет криогенной и мембранной азотных установок.
4. Рассмотреть основные факторы воздействия криогенной азотной установки на окружающую среду, а также средства индивидуальной и коллективной защиты работников.
5. Выполнить чертежи технологических схем установок.

					ВКР.245947.180301.ПЗ									
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Анализ методов получения азота на примере Амурского газоперерабатывающего завода					Лит.		Лист	Листов	
Разраб.		Сергеева А.В.									у		6	68
Провер.		Гужель Ю.А.								АмГУ ИКиИН 1107-об гр.				
Реценз.														
Н. Контр.		Родина Т.А.												
Утверд.		Гужель Ю.А.												

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Амурский газоперерабатывающий завод

Амурский газоперерабатывающий завод (АмГПЗ) – стратегический объект, расположенный в Дальневосточном федеральном округе, близ города Свободный (Амурская область). Предприятие занимает лидирующие позиции в России и входит в число крупнейших в мире по объемам перерабатываемого газа, являясь ключевым звеном Восточной газовой программы ПАО «Газпром». Проект выделяется не только масштабом (годовая мощность – 42 млрд м³ газа), но и технологической инновационностью, не имеющей аналогов в отечественной газовой промышленности.

Завод является мировым лидером по производству гелия – до 60 млн м³ ежегодно, что подчеркивает его роль в глобальной цепочке поставок этого ресурса. Инфраструктура АмГПЗ спроектирована для работы в экстремальных климатических условиях, сочетая передовые инженерные решения и автоматизированные системы контроля. Его функционирование обеспечивает не только энергетическую безопасность региона, но и укрепляет экспортный потенциал страны, особенно в контексте поставок в страны АТР. Уникальность предприятия заключается в интеграции масштабных мощностей, высокотехнологичных процессов и экологических стандартов, соответствующих международным требованиям.

Завод перерабатывает многокомпонентный газ, поступающий по газопроводу «Сила Сибири» из Чаяндинского и Ковыктинского месторождений. В перечень выпускаемой продукции входит:

- товарный газ;
- этановая, пропановая, бутановая и пентан-гексановая фракции;

					ВКР.245947.180301.ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					
Разраб.		Сергеева А.В.			Анализ методов получения азота на примере Амурского газоперерабатывающего завода	Лит.		Лист	Листов
Провер.		Гужель Ю.А.				у		7	68
Реценз.						АмГУ ИКиИН 1107-об гр.			
Н. Контр.		Родина Т.А.							
Утверд.		Гужель Ю.А.							

– гелий [1, 2].

Очищенный метан поставляется в северо-западные провинции Китая по тому же газопроводу. Кроме того, Амурский ГПЗ обеспечивает сырьем Амурский газохимический комплекс (АГХК) компании СИБУР, где будет производиться полипропилен и полиэтилен.

В проекте Амурского ГПЗ предусмотрено шесть идентичных технологических линий мощностью по 7 млрд м³ газа в год каждая. На площадке также зарезервировано место для седьмой и восьмой линий – на случай расширения экспортных поставок в Китай.

1.1.1 Описание блок-схемы Амурского ГПЗ

На рисунке 1 представлена блок-схема Амурского ГПЗ.

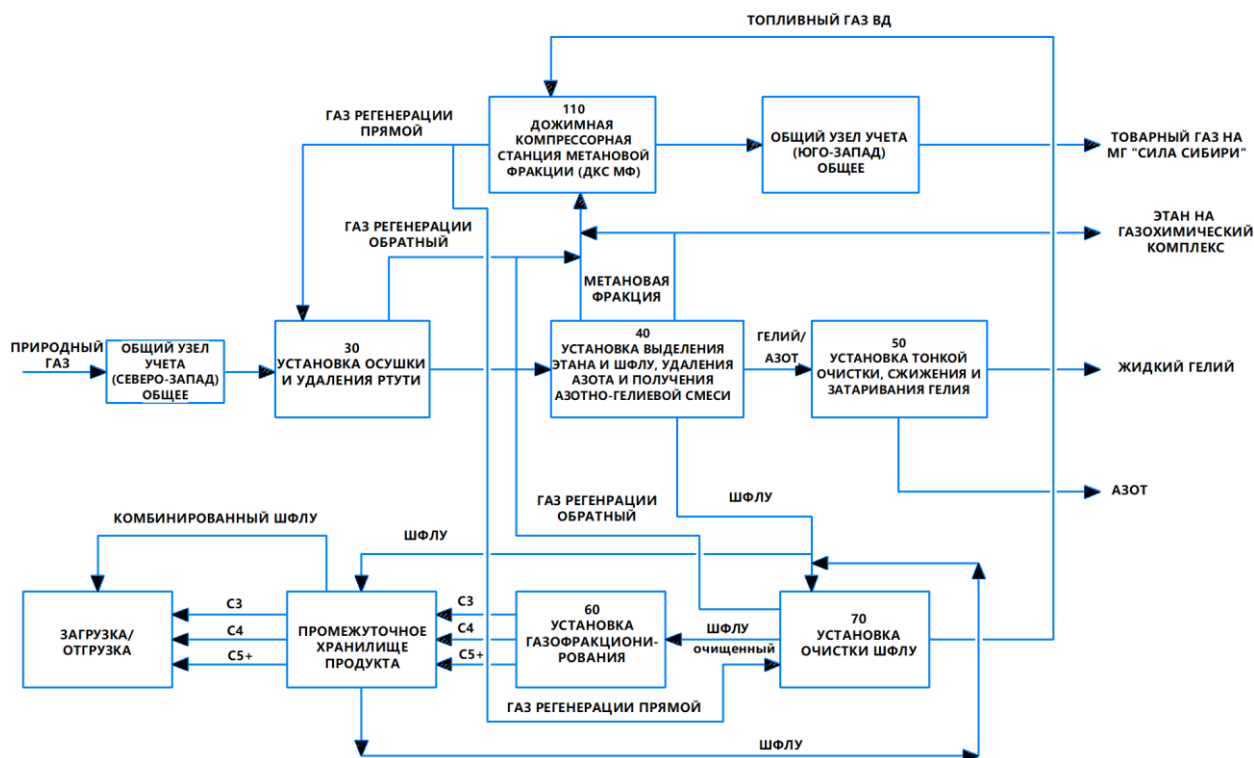


Рисунок 1 – Блок-схема Амурского ГПЗ

Технологическая цепочка на Амурском ГПЗ начинается с учета входных объемов газа. Первичная подготовка включает очистку и осушку на цеолитовом адсорбенте. После насыщения адсорбент регенерируется и возвращается в цикл. Осушенный газ проходит дополнительную очистку от ртути и метанола, а

затем направляется на криогенную установку, где разделяется на этан, широкую фракцию легких углеводородов (ШФЛУ) и азотно-гелиевую смесь. Разделение происходит при криогенных температурах, создаваемых за счет расширения газа в турбинных установках и работы тепловых насосов [3].

После сепарации продукты разделения проходят следующие этапы:

– Метановая фракция проходит многоступенчатое сжатие на ДКС (дожимная компрессорная станция) и направляется в магистральный газопровод для экспортных поставок.

– Азотно-гелиевая смесь – в сепарационный модуль, где при сверхнизких температурах происходит отделение гелия от азота. Технический азот рециркулирует в производственный контур, избыток подлежит атмосферному сбросу. Сжиженный гелий поставляется потребителям в изотермических контейнерах с использованием транспортной логистики.

– Углеводородная смесь C_{2+} подвергается фракционированию с выделением ШФЛУ и этана: широкая фракция проходит доочистку от сернистых соединений, после чего либо отправляется на газодифракционный комплекс, либо реализуется как товарный продукт. Этан временно вводится в экспортную инфраструктуру до запуска мощностей АГХК для углубленной переработки.

– На финальной стадии ШФЛУ поступает в газодифракционный комплекс, где разделяется на пропан-бутановые и тяжелые углеводородные фракции (C_{5+}), готовые к коммерческому использованию [3].

Технологический цикл спроектирован с акцентом на максимальное извлечение компонентов с высокой добавленной стоимостью при минимизации ресурсных потерь, что соответствует принципам экологически ответственного производства. Основные технологические компоненты Амурского газоперерабатывающего завода представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технологические компоненты АмГПЗ

Технологические установки	Количество технологических ниток
Замерная установка природного газа	2

Продолжение таблицы 1

Технологические установки	Количество технологических ниток
Установки очистки и осушки газа	6
Установка выделения этана и ШФЛУ, удаления азота и производства азотно-гелиевого концентрата	6
Замерная установка этана	6
Газофракционирующая установка	3
Установка очистки ШФЛУ	3
Установка получения гелия	3
Дожимные компрессорные станции для метановой фракции	6
Замерная установка метана	2
Установки факельной системы	3
Резервуарный парк для хранения сжиженных газов (товарная продукция)	3
Эстакады и участок железнодорожного пути для отгрузки и экспортных и сжиженных газов	2
Замерная установка топливного газа	2
Установка подготовки топливного газа	1
Установка для производства воздуха и азота	3

1.1.2 Характеристика сырьевого газа и готовой продукции

Сырьевой основой Амурского ГПЗ являются поставки природного газа с Чаяндинского и Ковыктинского месторождений по газопроводу «Сила Сибири», запущенному в эксплуатацию в декабре 2019 года. Характеристика сырьевого газа представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика сырьевого газа

Показатели обязательные для проверки	Регламентируемые показатели
Мольное содержание компонентов:	Приведено справочно
водород, %	0,03 ÷ 0,06
гелий, %	0,14 ÷ 0,4
азот, %	4,5 ÷ 7,30
диоксид углерода, %	0,06 ÷ 0,14
метан, %	85,17 ÷ 88,57
этан, %	4,60 ÷ 4,83
пропан, %	1,27 ÷ 1,56
изо-бутан, %	0,18 ÷ 0,23
н-бутан, %	0,29 ÷ 0,36
изо-пентан, %	0,07 ÷ 0,072
н-пентан, %	0,04 ÷ 0,043
C ₆₊ , %	0,01 ÷ 0,012

Продолжение таблицы 2

Показатели обязательные для проверки	Регламентируемые показатели
метанол, ppm мол.	0,0088 ÷ 226
вода, ppm мол.	0,0088 ÷ 0,23
Компонентный состав, молярная доля, %	Определение обязательно
Температура точки росы по воде (ТТРв) при абсолютном давлении 3,92 МПа (40,0 кгс/см ²), °С, не выше: – зимний период – летний период	минус 20 минус 14
Температура точки росы по углеводородам (ТТРуv) при абсолютном давлении от 2,5 до 7,5 МПа, °С, не выше: – зимний период – летний период	минус 10 минус 5,0
Массовая концентрация сероводорода, г/м ³ , не более	0,007
Массовая концентрация меркаптановой серы, г/м ³ , не более	0,016
Массовая концентрация общей серы, г/м ³ , не более	0,030
Теплота сгорания низшая при стандартных условиях, МДж/м ³ (ккал/м ³), не менее	31,80/(7600)
Молярная доля кислорода, %, не более	0,020
Молярная доля диоксида углерода, %, не более	2,50
Массовая концентрация механических примесей, г/м ³ , не более	0,001
Плотность при стандартных условиях, кг/м ³	Не нормируют, определение обязательно

Применение метановой фракции и этана:

– Топливо: метан низкого давления используется для выработки электроэнергии и тепла [4].

– Регенерация и охлаждение: используется в процессах восстановления цеолитного адсорбента, что продлевает срок его службы и снижает энергозатраты [5].

Этан, выделяемый в составе газовых фракций, служит основным сырьем для нефтехимического синтеза. Его переработка позволяет получать этилен – ключевой компонент для производства широкого спектра химических соединений. На базе этилена создаются: этиловый спирт, глицерин и этиленгликоль; хлорированные производные (дихлорэтан, хлористый этил), а также полиэтилен – основной материал для полимерной индустрии.

Дальнейшая трансформация этих веществ обеспечивает выпуск лакокрасочных материалов, растворителей, поверхностно-активных веществ, синтетических красителей и иной продукции химического комплекса.

Использование сжиженных углеводородных газов (СУГ) [6]:

- газификация удаленных населенных пунктов и промышленных объектов, недоступных для магистральных газопроводов (доставка автомобильным, железнодорожным и водным транспортом);
- применение в качестве газомоторного топлива;
- сырье для нефтехимических производств.

Пентан-гексановая фракция служит основой для [7]:

- высокооктанового бензина;
- синтетических каучуков;
- углеводородных растворителей.

Процесс включает низкотемпературную изомеризацию и удаление легких фракций, что повышает октановое число, улучшает антидетонационные свойства и снижает содержание вредных компонентов (ароматических углеводородов, бензола).

Сферы использования гелия [8, 9]:

- Медицина: смеси He-O₂ облегчают дыхание при астме и болезнях легких; жидкий гелий применяется в сверхпроводящих магнитах аппаратов МРТ.
- Военная промышленность: гелий используется для вытеснения горючих жидкостей и порошков в ракетных системах благодаря своей инертности и низкой вязкости.
- Metallургия: защитная среда при сварке цветных металлов (более высокая теплопроводность по сравнению с аргоном обеспечивает лучшее качество швов).
- Переработка газа: хладагент в криогенных установках для сжижения и разделения газов, хранения СПГ.

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

1.2 Общие сведения об азоте

Азот (от лат. Nitrogenium, что означает «рождающий селитру») был открыт Д. Резерфордом в 1772 году.

1.2.1 Содержание азота в природе

Азот составляет 0,1 % массы земной коры. Основная его часть (75,6 % по массе или 78,09 % по объему) сосредоточена в атмосфере в свободном состоянии. В связанном виде он присутствует в воде, воздухе, а также в минералах, таких как натриевая (чилийская) селитра NaNO_3 и калиевая селитра KNO_3 . В космосе азот обнаружен в составе комет, туманностей и солнечной атмосферы в виде соединений NO , $(\text{CN})_2$, NH_3 [10].

1.2.2 Характеристика азота

Азот – бесцветный газ без запаха, сохраняющий эти свойства даже в жидком и твердом состояниях. Его температура плавления составляет минус 210 °С, а температура кипения – минус 196 °С. В воде растворяется слабо – около 2 % по объему. Молекула N_2 устойчива и не распадается на атомы даже при высоких температурах.

Химически азот инертен: при стандартных условиях не взаимодействует с большинством веществ, кроме лития. При нагревании реагирует с металлами (например, с магнием), образуя нитриды (Mg_3N_2) [11, 12].

1.2.3 Роль азота в газопереработке. Применение азота на Амурском газоперерабатывающем заводе

Азот играет ключевую роль в газовой промышленности:

- Контроль герметичности. Закачивается под давлением в трубопроводы и резервуары для выявления утечек.
- Транспортировка химических продуктов. Азот используется как инертная среда.
- Продувка и осушение трубопроводов и емкостей. После их прокладки и ремонта при помощи азота, точка росы которого ниже минус 50 °С. Это позволяет вытеснить кислород, высушить трубы и удалить вредные вещества.

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

– Тушение пожаров. Подавление горения в закрытых пространствах при помощи азота без повреждения инфраструктуры.

– Работа пневматического оборудования. Заменяет воздух, исключая риски окисления [13].

На Амурском ГПЗ применяют азот высокого, среднего и низкого давления:

- азот низкого давления (НД) подается под давлением от 0,6 до 0,8 МПа и при температуре окружающей среды. Он распределяется по различным потребителям установки через трубопроводы коллектора и применяется во время нормального режима установки, а также во время останова установки для технического обслуживания.

- азот среднего давления (СД) подается под давлением от 2,5 до 3,6 МПа (изб.) и при температуре окружающей среды. Он распределяется по различным потребителям установки через трубопроводы коллектора и необходим для дренирования дренажных емкостей. По сети трубопроводов азот СД подается к энергопостам, где азот СД используется для технического обслуживания, испытаний под давлением с использованием газа и испытаний на герметичность.

- азот высокого давления (ВД) подается под давлением 13,0 МПа (изб.) и при температуре окружающей среды. Он распределяется по различным потребителям установки через трубопроводы коллектора. По сети трубопроводов азот ВД подается к энергопостам, где используется для технического обслуживания, испытаний под давлением с использованием газа и испытаний на герметичность [13].

1.3 Анализ методов получения азота

Основные промышленные способы получения азота связаны с разделением атмосферного воздуха, содержащего примерно 75 % этого газа. Азот производят как для внутренних нужд предприятий, так и в качестве товарного продукта. С воздухоразделительных установок он может транспортироваться к потребителям:

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

- по трубопроводам;
- в баллонах под давлением;
- в сжиженном состоянии для упрощения хранения и логистики.

Технология производства азота в промышленности включает в себя три основных метода:

- криогенный;
- мембранный;
- адсорбционный.

Выбор технологии зависит от требуемого агрегатного состояния и степени чистоты конечного продукта [14-16].

1.3.1 Криогенный метод

Криогенный метод – единственная технология, обеспечивающая высокую чистоту продуктов разделения при максимальном коэффициенте извлечения и возможности масштабирования производства, что делает его экономически выгодным.

1.3.1.1 Сущность метода

В основе технологии лежит различие температур кипения компонентов воздуха и разница состава жидкой и газообразной фаз. Процесс реализуется при экстремально низких температурах (менее 120 К или минус 153 °С), где происходит интенсивный массо- и теплообмен. В результате паровая фаза насыщается азотом (низкокипящий компонент), а жидкая – кислородом (высококипящий компонент) [16, 17].

Данный метод не ограничивается выделением азота: он также обеспечивает получение кислорода, аргона и редких газов, что расширяет его использование в металлургии и химическом производстве. Для перевода воздуха в жидкое состояние его охлаждают до температур в диапазоне от минус 191,8 °С до минус 193,7 °С при нормальном атмосферном давлении.

Согласно физическим законам, температура кипения газов коррелирует с давлением – ее рост наблюдается при увеличении давления. Однако критичес-

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

кая температура (максимальный порог сжижения) строго индивидуальна для каждого вещества. Для воздуха этот показатель равен минус 140,7 °С при критическом давлении 37,2 атм. Поднимая давление до указанного уровня, температуру конденсации можно повысить с минус 193,7 °С до минус 140,7 °С, что оптимизирует энергозатраты процесса [18, 19]. Таким образом, регулирование давления позволяет управлять фазовыми переходами, сохраняя эффективность технологии даже в экстремальных условиях.

1.3.1.2 Эффект Джоуля-Томсона

Технологии создания сверхнизких температур для сжижения газов столкнулись с отсутствием природных хладагентов, способных обеспечить необходимый режим. Прорыв в этой области связан с открытием в 1852 году эффекта Джоуля-Томсона, демонстрирующего изменение температуры реальных газов при адиабатическом дросселировании. Исследование эффекта Джоуля-Томсона представлено на рисунке 2.

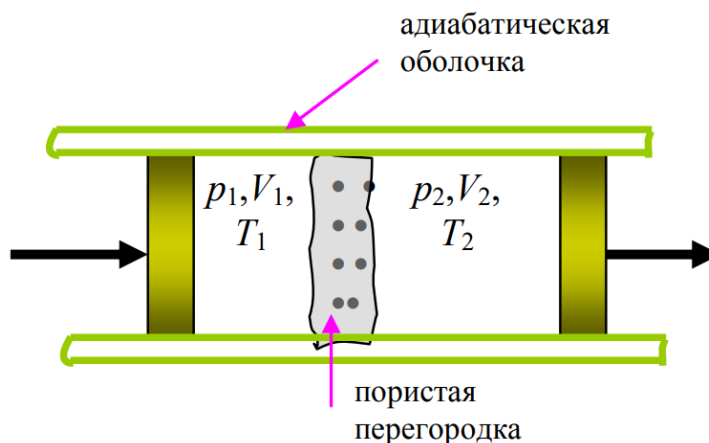


Рисунок 2 – Исследование эффекта Джоуля-Томсона

Суть метода заключается в пропускании газа через пористый барьер из зоны высокого давления (p_1) в область с существенно меньшим давлением (p_2), где объем системы (V_2) значительно превышает исходный (V_1). В адиабатических условиях это приводит к температурной разнице между зонами: $T_1 \neq T_2$. Для большинства газов (кроме водорода и гелия) при комнатной температуре (~ 300 К) наблюдается охлаждение потока после дросселирования ($T_1 > T_2$).

Физической основой эффекта является взаимодействие молекул газа во время прохождения через барьер, что характерно только для реальных газов с выраженными межмолекулярными силами. Знак температурного перепада ($T_2 - T_1 = \Delta T$) определяет направленность эффекта. Если:

$\Delta T < 0$ – то имеем положительный эффект Джоуля-Томсона,

$\Delta T > 0$ – то имеем отрицательный эффект Джоуля-Томсона [20, 21].

1.3.1.3 Способы получения глубокого холода

Для достижения экстремально низких температур в газоперерабатывающих технологиях применяют три подхода: внутренние, каскадные и гибридные холодильные циклы. Внутренние циклы функционируют благодаря энергетическим преобразованиям в системе – изохнтальпийному расширению (дресселирование) или изохнтропийному (расширение в детандерах).

Дрессельные системы, основанные на эффекте Джоуля-Томсона, эффективны при существенных перепадах давления. В случаях минимальных перепадов оптимальным становится использование детандеров, где энергия газового потока преобразуется в механическую работу, снижая температуру. На практике реализуют два ключевых метода: дресселирование предварительно сжатого и охлажденного газа, а также расширение с отдачей внешней работы, что позволяет гибко управлять тепловыми режимами [18]. Принципиальная схема дрессельного расширения показана на рисунке 3, а.

В основе дрессельного цикла лежит изотермическое сжатие газа (начальные параметры: давление p_1 , температура T_1) в компрессоре до уровня p_2 . После дресселирования до исходного давления p_1 температура потока снижается до T_2 при постоянной энтальпии. Охлажденный газ в теплообменнике отдает свой холод входному потоку, а сам нагревается. Холодопроизводительность системы определяется разницей энтальпий до и после сжатия, соответствующей работе компрессора, выраженной в тепловых единицах.

Детандеры (от франц. «расширять») обеспечивают расширение газа с генерацией внешней работы. Теоретически процесс изохнтропийный, но реаль-

ные условия вносят отклонения от адиабатического режима. В таких установках газ, сжатый до давления p_2 , возвращается к давлению p_1 через детандер, что сопровождается охлаждением. Устройства делятся на два типа: объемные (поршневые, ротационные), применяемые для глубокого охлаждения, и турбодетандеры с динамическим преобразованием энергии.

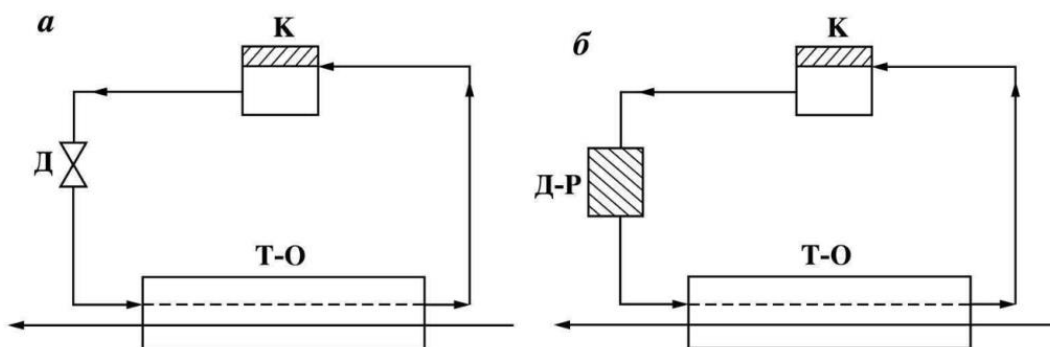


Рисунок 3 – Схемы дроссельного (а), детандерного (б) расширения сжатого газа:
К – компрессор; Д – дроссель; Д-Р – детандер-расширитель; Т-О – теплообменник

В турбодетандерах сжатый газ поступает в сопловой аппарат, где ускоряется с падением давления и энтальпии, после чего передает кинетическую энергию лопаткам вращающегося колеса, генерируя механическую работу. Этап завершается выводом охлажденного потока к потребителю. Процесс включает преобразование энергии сжатого газа в кинетическую (в соплах) и далее – в механическую (на лопатках), что снижает энтальпию и обеспечивает генерацию холода.

Каскадные системы объединяют последовательные ступени охлаждения с хладагентами разной температуры кипения. Каждая предыдущая ступень конденсирует пары последующей: например, в установках для сжижения природного газа пропан (первая ступень) охлаждается водой, затем конденсирует этан (вторая ступень), который, в свою очередь, обеспечивает сжижение метана (третья ступень). Преимущество метода – снижение энергопотребления за счет рекуперации, однако система требует комплекса оборудования (компрессоры,

теплообменники) и точного управления потоками [22].

Принципиальная схема каскадного холодильного цикла показана на рисунке 4.

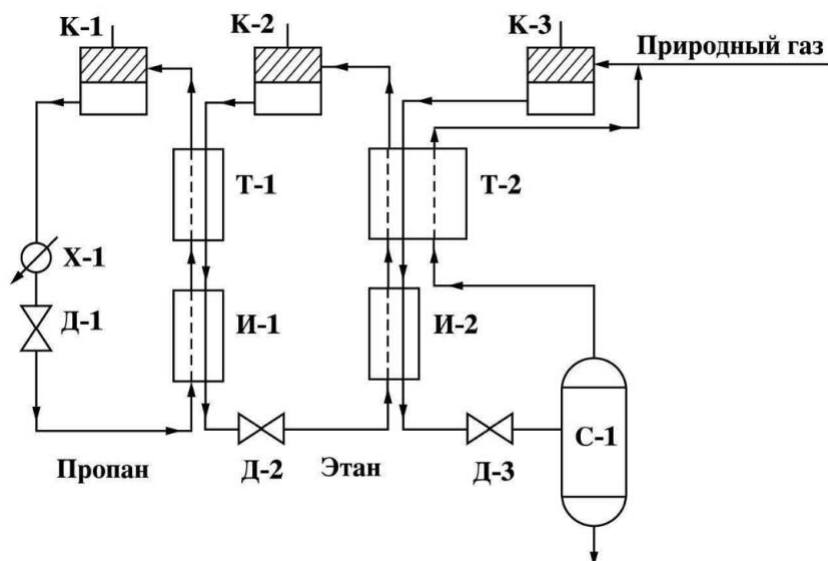


Рисунок 4 – Схемы каскадного холодильного цикла:

K-1, K-2, K-3 – компрессоры первой, второй и третьей ступеней соответственно;

X-1 – холодильник-конденсатор Д-1, Д-2, Д-3 – дроссели; Т-1, Т-2 – теплообменники; С-1 – сепаратор; И-1, И-2 – испарители

1.3.1.4 Схема криогенной азотной установки

Технология низкотемпературной ректификации воздуха состоит из последовательных стадий, включая подготовку сырья, сжижение и фракционное разделение. На первом этапе воздух очищается от механических примесей ($0,002\text{--}0,020\text{ г/м}^3$ пыли) с использованием рукавных фильтров или масляных очистителей, где поток пропускается через слой колец Рашига, обработанных маслом. Далее воздух сжимается в компрессорах до требуемого давления.

Осушение проводится методами адсорбции (силикагель, цеолиты) с остаточной влажностью $0,03\text{ г/м}^3$ или $0,005\text{ г/м}^3$ соответственно, либо вымораживанием при охлаждении до температур кристаллизации влаги. Регенерация адсорбентов выполняется нагреванием в азотной среде ($180\text{ °C} - 250\text{ °C}$). Очистка от CO_2 достигается химической абсорбцией щелочами, адсорбцией на цеолитах

или вымораживанием, снижая концентрацию до $20 - 25 \text{ см}^3/\text{м}^3$ при 100 К . Углеводороды удаляются низкотемпературной адсорбцией на силикагеле [23].

На рисунке 5 представлен пример криогенной системы получения азота.

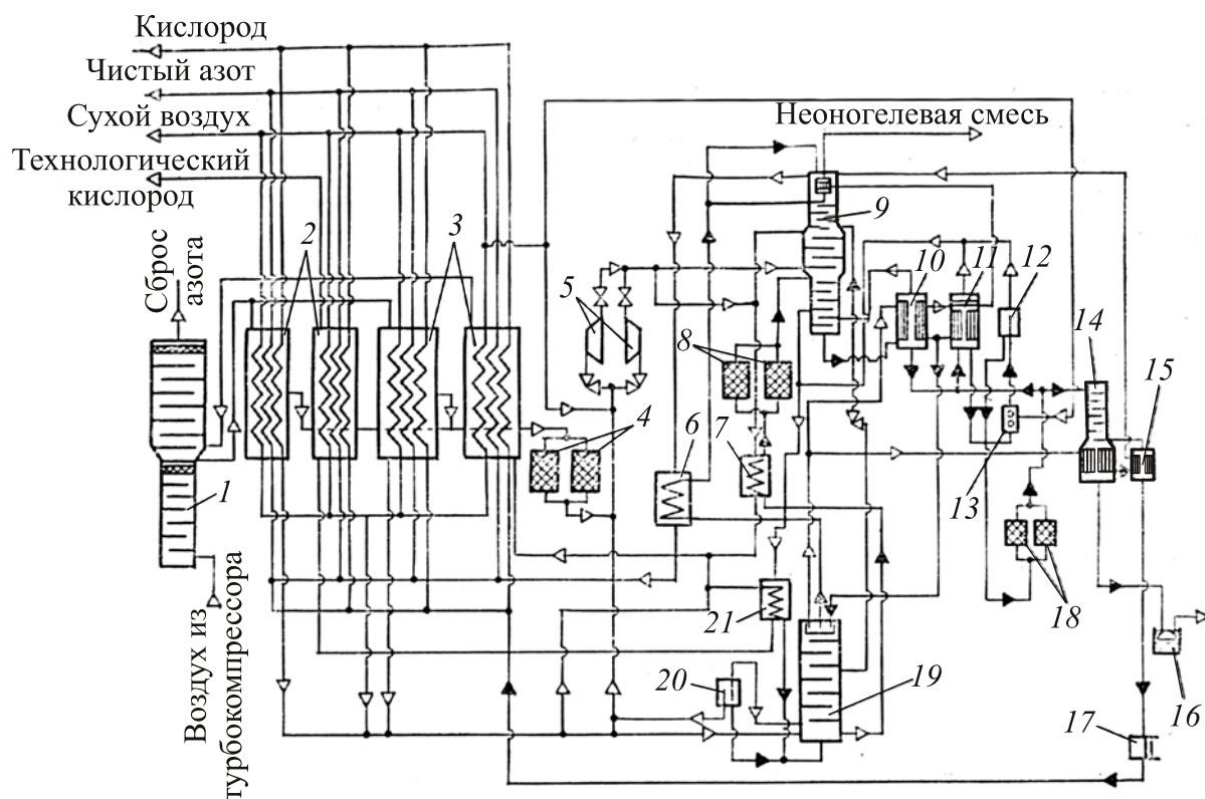


Рисунок 5 – Технологическая схема криогенной установки получения азота:
 1 – система азотно-водяного охлаждения; 2 – кислородные регенераторы; 3 – азотные регенераторы; 4 – газовые адсорберы; 5 – турбодетандеры; 6 – переохладитель азотной флегмы; 7 – переохладитель кубовой жидкости; 8 – адсорбер ацетилена; 9 – верхняя ректификационная колонна; 10 – основной конденсатор; 11 – выносной конденсатор; 12 – отделитель пара; 13 – форсунка газлифта; 14 – колонна технического кислорода; 15 – конденсатор-переохладитель; 16 – испаритель жидкого кислорода; 17 – насос жидкого кислорода; 18 – адсорбер ацетилена; 19 – нижняя ректификационная колонна; 20 – отделитель пара; 21 – подогреватель кислорода

Сжижение и разделение осуществляются в ректификационных колоннах. Сжатый до $0,6 \text{ МПа}$ воздух проходит через азотно-водяной охладитель, затем

поступает в кислородные и азотные регенераторы с базальтовой насадкой (90 % – фракция от 4 до 8 мм, 10 % – от 2 до 4 мм) и алюминиевыми змеевиками. Регенераторы переключаются каждые 9 – 15 минут: в азотных обрабатывается загрязненный азот, в кислородных — технологический кислород. Охлаждение до 100 К приводит к вымораживанию примесей. Петлевой поток (0,6 МПа, 148 К) очищается в адсорберах и расширяется в турбодетандере до 0,15 МПа (91 К), поступая на 14-ю тарелку верхней колонны.

В нижней колонне (36 тарелок) воздух разделяется на жидкость с 39 % – 40 % O_2 и азотную флегму. Кубовый продукт через переохладитель и адсорбер направляется в верхнюю колонну, где образуется технический кислород, чистый (99,998 %) и «грязный» азот. Последний, пройдя регенераторы, выбрасывается в атмосферу. Чистый азот нагревается в змеевиках и подается в цех синтеза аммиака.

Кислород очищается в циркуляционном контуре с адсорберами, форсункой газлифта и отделителем пара. Часть потока обогащается до 99,7 % O_2 в колонне, сжимается насосом до 16 МПа и испаряется в регенераторах. Газообразный кислород смешивается с потоком из верхней колонны, нагревается и поступает потребителю. Несконденсированные пары с неоном и гелием отводятся для дальнейшей переработки. Система обеспечивает эффективное разделение с сохранением энергоэффективности и высокого качества продукции [24-26].

1.3.1.5 Преимущества и недостатки метода

К достоинствам криогенного метода можно отнести следующее:

- высокая чистота продуктов разделения;
- возможность одновременного получения нескольких продуктов разделения;
- высокая производительность оборудования;
- получение продуктов, как в виде газа, так и в виде жидкости;
- более высокая гибкость технологии.

Однако метод не лишен недостатков. К ним можно отнести:

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

- более длительный, по сравнению с адсорбционными и мембранными установками, пусковой период;
- большие размеры оборудования;
- высокая изначальная стоимость оборудования;
- включает в себя множество компонентов: систему очистки, тепло- и массообменное оборудование, детандер, систему автоматики, что влечет за собой сложность обслуживания и повышает вероятность отказов.

В силу чего данный метод целесообразно применять для крупных стационарных комплексов большой производительности с длительным периодом непрерывной работы [27].

1.3.2 Мембранный метод

Данная технология получила широкое распространение в 1970-х годах, став прорывом в области выделения азота из атмосферного воздуха. В тот период мембранный метод кардинально изменил подход к сепарации газовых смесей, обеспечив эффективное отделение азота от других компонентов.

Сегодня эта технология продолжает активно совершенствоваться, адаптируясь к современным промышленным требованиям. Мембранный способ востребован благодаря своей надежности: отсутствие движущихся частей в установках обеспечивает многолетнюю стабильность работы при соблюдении эксплуатационных норм. Он особенно актуален в отраслях с крупномасштабным потреблением азота, таких как металлургия или химическая промышленность.

Однако экономическая целесообразность метода снижается при необходимости получения высокочистого азота (свыше 99,9 %), где традиционно применяются криогенные или адсорбционные технологии. Несмотря на это, мембранные системы остаются оптимальным решением для задач, требующих умеренной чистоты газа и минимальных эксплуатационных затрат.

1.3.2.1 Виды мембран

Основным конструктивным блоком мембранных систем разделения газов служит мембранный элемент, состоящий из входного и выходного каналов,

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

разделенных избирательно проницаемой мембраной. Архитектура элемента определяется типом разделительной поверхности (плоские, спиральные, трубчатые или волоконные структуры) и организацией потоков (параллельное, встречное, перекрестное движение или рециркуляция смеси).

В современных промышленных установках доминируют полуволоконные мембраны (рисунок 6), представляющие собой пористые полимерные волокна с нанесенным на внешнюю сторону ультратонким селективным слоем. Этот слой обеспечивает неравномерную проницаемость для различных газовых компонентов, что лежит в основе эффективности разделения [28].

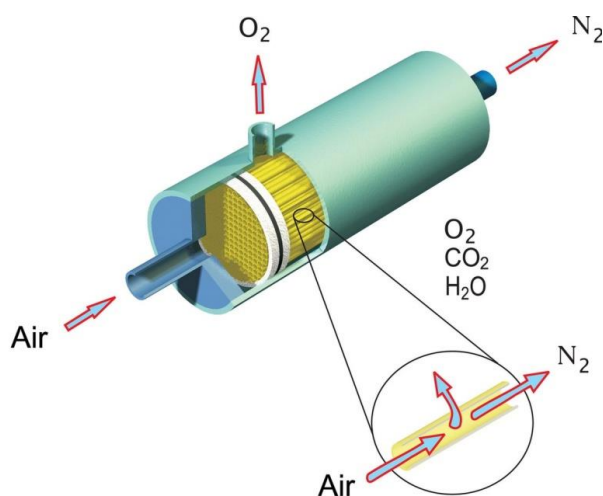


Рисунок 6 – Устройство мембранного модуля и скорость диффузии газов через стенки-мембраны волокон

Мембраны классифицируют на полупроницаемые (проницаемые только для одного компонента) и селективно-проницаемые (пропускающие все компоненты смеси, но с разной скоростью). В газоразделении применяют преимущественно селективно-проницаемые мембраны, через которые компоненты диффундируют с различной интенсивностью, что и лежит в основе разделения смесей [29, 30].

1.3.2.2 Принцип работы мембраны

Мембранные модули для разделения воздуха представляют собой цилиндрические конструкции, заполненные параллельно расположенными полимер-

ными волокнами на основе полиимида, полисульфона или полифенилоксида. Сжатый воздух поступает во входную зону модуля и равномерно распределяется вдоль внутренних полостей волокон. Каждое волокно имеет асимметричную структуру с пористыми стенками, где внешний селективный слой определяет скорость проницаемости газов. Наибольшую скорость диффузии демонстрируют вода (H_2O), водород (H_2) и гелий (He), которые быстро проникают через поры. Кислород (O_2) и углекислый газ (CO_2) перемещаются с умеренной скоростью, в то время как азот (N_2), аргон (Ar) и угарный газ (CO) задерживаются внутри волокон из-за низкой проницаемости, формируя целевой поток [30, 31].

1.3.2.3 Схема мембранной азотной установки

Существуют одноступенчатые и многоступенчатые мембранные установки по получению азота. Одноступенчатые мембранные установки получили популярность благодаря низкой стоимости производства, монтажа и интеграции в трубопроводные системы. Однако при повышении требований к чистоте азота их эффективность снижается: выход продукта уменьшается, а необходимость увеличения площади мембран и мощности оборудования делает такие системы менее практичными.

Двухступенчатые системы используются для получения азота с чистотой 97 % – 99,5 %, причем стандартный показатель составляет около 98 %. Достижение чистоты свыше 99 % требует значительного роста мощности, увеличения площади мембран и перепадов давления, что технически сложно и экономически невыгодно. Эти ограничения делают двухступенчатые установки малоприменимыми для задач, требующих сверхвысокой чистоты газа, где предпочтение отдается криогенным или адсорбционным методам [30].

Технологическая схема мембранного метода получения азота представлена на рисунке 7.

Атмосферный воздух подвергается компримированию, тщательной фильтрации от частиц и углеводородных паров, подогреву и подаче в мембранные модули, содержащие тысячи полых волокон. Внутри волокон сжатый воздух

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

движется под давлением, при этом кислород и пары воды быстро диффундируют через полимерную мембрану и выводятся через один из патрубков модуля в атмосферу или сеть. Азот, как целевой продукт, проходит через мембрану с меньшей скоростью и отводится потребителю через второй патрубок без существенной потери давления.

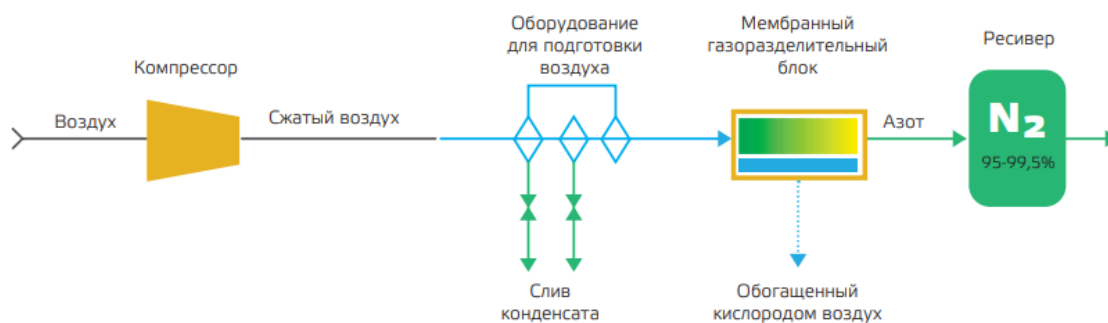


Рисунок 7 – Схема мембранного метода получения азота

На рисунке 8 представлен принцип работы азотного мембранного блока.

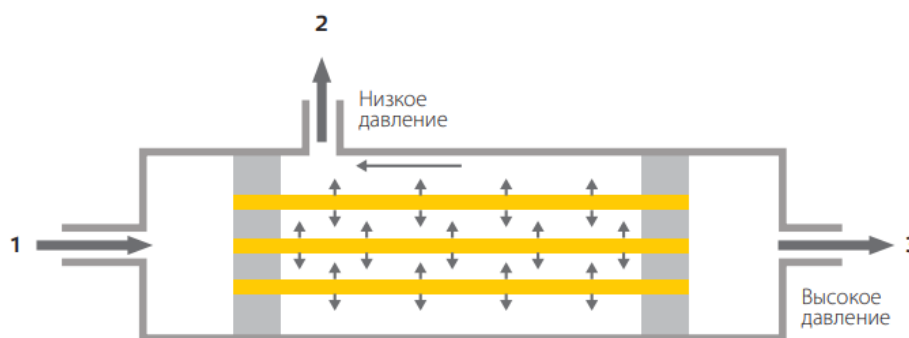


Рисунок 8 – Схема мембранного азотного блока:

1 – сжатый воздух; 2 – насыщенный кислородом выходной поток; 3 – азот с чистотой 90 % – 99,5 %

Процесс начинается с компримирования воздуха компрессором, его нагрева до требуемой температуры и подачи в газоразделительный блок. Селективность мембраны обеспечивает эффективное отделение кислорода и влаги, которые удаляются через «свечу», в то время как азот сохраняет давление и направляется к конечному потребителю. Данная технология демонстрирует высокую эффективность за счет асимметричной структуры мембран и оптими-

зированной геометрии волокон, что минимизирует энергозатраты и обеспечивает стабильность работы системы [32, 33].

1.3.2.4 Преимущества и недостатки метода

К ключевым достоинствам данной технологии относятся:

- минимальный шум в процессе работы установки;
- отсутствие необходимости в техническом обслуживании (мембранные модули не имеют движущихся частей и конструктивно проще адсорбционных/криогенных аналогов);
- мобильность: компактные размеры позволяют размещать оборудование в блок-контейнеры или на шасси для транспортировки между объектами;
- устойчивость к влаге: метод не чувствителен к наличию пароводяной воды в сжатом воздухе;
- энергоэффективность: отсутствие фазовых переходов снижает энергопотребление [33, 34].

К сожалению, современные конструктивные особенности мембранных систем для генерации азота, а также физико-химические характеристики используемых материалов (полимеры, композиты) не обеспечивают достижение уровня чистоты продукта более 99,5 % [31].

1.3.3 Адсорбционный метод

Адсорбционная технология разделения азота из воздуха базируется на разнице размеров молекул его ключевых компонентов – азота (N_2) и кислорода (O_2). Установка включает несколько парных адсорбционных колонн (чаще две или более, в четном количестве), заполненных углеродными молекулярными ситами (УМС). Адсорбент представляет собой черные цилиндрические гранулы диаметром 1,3 мм (рисунок 9), обладающие микропористой структурой, селективно задерживающей молекулы кислорода за счет большего кинетического диаметра (0,346 нм против 0,364 нм у O_2). Циклический процесс адсорбции-десорбции в колоннах обеспечивает непрерывное получение азота с заданной чистотой, зависящей от режима работы и характеристик сит [33, 34].

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26



Рисунок 9 – Углеродные молекулярные сита

1.3.3.1 Сущность метода

Углеродные молекулярные сита (УМС), используемые в адсорбционных системах для выделения азота, обладают микропористой структурой с диаметром входных каналов около $3 \text{ \AA}$ ($0,3 \text{ нм}$). Эта особенность позволяет задерживать молекулы кислорода (кинетический диаметр $\sim 2,9 \text{ \AA}$) внутри пор, тогда как более крупные молекулы азота ($3,1 \text{ \AA}$) преимущественно проходят через слой сорбента. Однако в реальных условиях наблюдается неполная селективность: часть кислорода не адсорбируется, а некоторое количество азота задерживается в порах свыше $3,0 \text{ \AA}$. Несмотря на это, установка генерирует газовую смесь с повышенной концентрацией азота. Дополнительно УМС частично удаляют влагу из сжатого воздуха, но для увеличения срока службы сорбента необходима предварительная осушка поступающего потока. Конечный азотный продукт также проходит этап дополнительной осушки [31].

Ограниченная адсорбционная емкость УМС требует периодической регенерации. Процесс включает резкое снижение давления до атмосферного, что стимулирует десорбцию кислорода. Для оптимизации восстановления сорбента через колонну в режиме регенерации пропускают порцию азота, полученного в параллельном модуле. Продувка осуществляется под давлением, превышающим атмосферное, что обеспечивает вытеснение остаточного кислорода из пор.

Образовавшаяся смесь (воздух с повышенным содержанием O_2) выводится в атмосферу. После этого в адсорбер подают азот при закрытом сбросном клапане, восстанавливая рабочее давление системы до эксплуатационных параметров.

1.3.3.2 Схема адсорбционной азотной установки

Схема адсорбционной азотной установки представлена на рисунке 10.

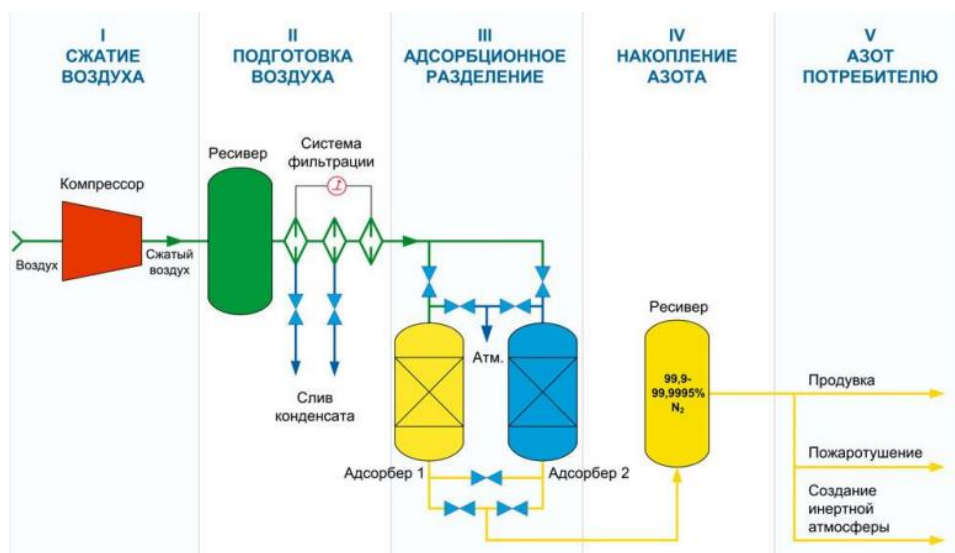


Рисунок 10 – Технологическая схема адсорбционной азотной установки

В адсорбционных системах производства азота применяется технология короткоцикловой безнагревной адсорбции (КЦБА), предполагающая циклическое переключение функций между парными адсорберами: активный модуль переходит в фазу регенерации, а восстановленный – начинает рабочий цикл. Термин «короткоцикловой» подчеркивает высокую частоту смены режимов (каждые несколько минут), а «безнагревной» – отсутствие термического воздействия при регенерации углеродных молекулярных сит (УМС), которая осуществляется продувкой азотом при комнатной температуре. Этот подход обеспечивает непрерывность процесса за счет синхронизации циклов адсорбции и десорбции, минимизируя энергозатраты на восстановление сорбционной способности УМС.

Сжатый воздух, предварительно очищенный от пыли и капельной влаги,

подается снизу колонны. При прохождении через слой УМС кислород адсорбируется на пористой поверхности, а газовая смесь постепенно обогащается азотом. Часть производционного азота (15 % – 20 %) направляется сверху во второй адсорбер для регенерации сит. После завершения полуцикла давление в колоннах выравнивается, и происходит их переключение. Полученный азот накапливается в буферном ресивере, компенсирующем колебания давления; его объем зависит от производительности установки и размера адсорберов. Далее азот поступает потребителю через систему контроля чистоты, расхода и давления [35].

1.3.3.3 Преимущества и недостатки метода

Адсорбционные генераторы азота отличаются низкими капитальными и эксплуатационными расходами, малогабаритными размерами, а также простой конструкции и обслуживания. Они способны производить азот в небольших и средних количествах, достигая уровня чистоты до 99,999 %, как и криогенные аналоги. Однако, в отличие от криогенных систем, где выпуск азота с чистотой ниже определенного порога (например, 95 %) экономически нецелесообразен, адсорбционные установки позволяют гибко настраивать параметры продукта в диапазоне от 99,99 % до 95 %. При этом уменьшение требований к чистоте (например, до 95 %) повышает производительность оборудования и снижает расход сжатого воздуха на 15 % – 30 %, что оптимизирует энергоэффективность процесса.

К недостаткам метода относятся:

- зависимость от влажности – пары воды в сжатом воздухе снижают эффективность адсорбции, поэтому необходима предварительная осушка;
- невозможность получения жидкого азота и технического кислорода с чистотой выше 95 %.

2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Характеристика сырья и готовой продукции

Сырьем для установки производства азота является атмосферный воздух.

Характеристика атмосферного воздуха приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристика сырья

Наименование сырья	Компонент	Объемная доля, %
Атмосферный воздух	азот (N ₂)	78,09
	кислород (O ₂)	20,95
	аргон (Ar)	0,93
	двуокись углерода (CO ₂)	0,03
	неон (Ne)	0,0018
	гелий (He)	0,00052
	криптон (Kr)	0,00011
	ксенон (Xe)	0,0000087
	метан (CH ₄)	0,00015
	водород (H ₂)	0,00005

На установке получают следующую готовую продукцию: подготовленный очищенный азот низкого, среднего и высокого давления. Характеристика готовой продукции приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристика готовой продукции

Наименование сырья	Показатели	Регламентируемые показатели
Азот НД 1-й сорт	Давление рабочее, МПа	0,6-0,9
	Температура рабочая, °С	Окружающей среды
	Точка росы по воде при максимальном давлении подачи, °С, не более	минус 80
	Концентрация азота, % об., не менее	99,60
	Давление рабочее, МПа	0,6-0,9
	Температура рабочая, °С	Окружающей среды
	Точка росы по воде при максимальном давлении подачи, °С, не более	минус 80
	Концентрация азота, % об., не менее	99,60

					ВКР.245947.180301.ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					
Разраб.		Сергеева А.В.			Анализ методов получения азота на примере Амурского газоперерабатывающего завода	Лит.	Лист	Листов	
Провер.		Гужель Ю.А.				У	30	68	
Реценз.						АмГУ ИКиИН 1107-об гр.			
Н. Контр.		Родина Т.А.							
Утверд.		Гужель Ю.А.							

Наименование сырья	Показатели	Регламентируемые показатели
Азот НД 1-й сорт	Концентрация кислорода, % об., не более	0,40
	Содержание масла, мг/м ³ , не более	0,01
Азот СД 1-й сорт	Давление рабочее, МПа	2,5 – 3,6
	Температура рабочая, °С	Окружающей среды
	Точка росы по воде при максимальном давлении подачи, °С, не более	минус 80
	Концентрация азота, % об., не менее	99,60
	Концентрация кислорода, % об., не более	0,40
	Содержание масла, мг/м ³ , не более	0,01
Азот ВД 1-й сорт	Давление рабочее, МПа	13
	Температура рабочая, °С	Окружающей среды
	Точка росы по воде при максимальном давлении подачи, °С, не более	минус 80
	Концентрация азота, % об., не менее	99,60
	Концентрация кислорода, % об., не более	0,40
	Содержание масла, мг/м ³ , не более	0,01

2.2 Описание технологической схемы криогенной азотной установки

Технологическая схема установки производства азота представлена на рисунке 11.

Атмосферный воздух с температурой от минус 52 °С до 47 °С, проходит входной воздушный фильтр Ф-1 и сжимается в главном воздушном трехступенчатом компрессоре КМ-1 до давления около 0,92 МПа. Чтобы избежать образования льда, который может заблокировать фильтрующие элементы, фильтр входного воздуха оснащен внутренним нагревателем. После стадии компрессии воздух охлаждается в оснащённом вентилятором предохладителе ПО-1 для удаления теплоты сжатия.

Избыточная влага, содержащаяся в потоке охлажденного воздуха, удаляется в сепараторе С-1. Затем охлажденный воздух подается в двухслойную систему предварительной очистки. В блоке очистки воздуха в качестве адсорбента используется слой молекулярных сит и слой активированного оксида алюминия. Адсорберы АД-1 и АД-2 работают периодически.

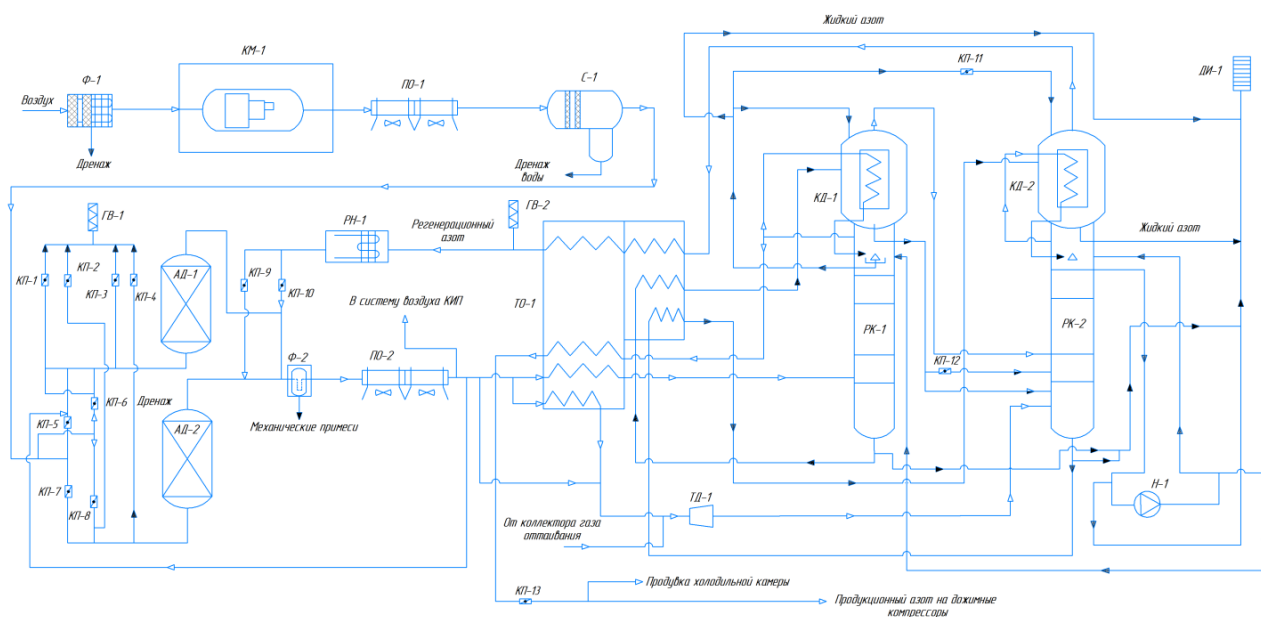


Рисунок 11 – Технологическая схема криогенного процесса получения азота из атмосферного воздуха:

Ф-1-2 – входной и противопылевой фильтры; КМ-1 – главный воздушный трехступенчатый компрессор; С-1 – сепаратор; КП-1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-12 – клапаны; ПО-1-2 – переохладители; АД-1-2 – адсорберы; ТО-1 – пластинчато-ребристый теплообменник; ГВ-1-2 – глушители выпуска; ТД-1 – турбодетандер; РК-1-2 – главная и вспомогательная ректификационные колонны; КД-1-2 – главный и вспомогательный конденсаторы; ДИ-1 – дренажный испаритель; Н-1 – насос, РН-1 – регенерационный нагреватель

Сначала в одном из них из потока воздуха удаляются оставшийся водяной пар, двуокись углерода, тяжелые углеводороды и некоторые легкие углеводороды, а в другом адсорбере в это время одновременно происходит регенерация неочищенным азотом, предварительно нагретым в регенерационном нагревателе РН-1. Затем адсорберы переключаются согласно заданному временному алгоритму при помощи воздушных клапанов – КП-5 и КП-7, клапанов для продувки и сброса давления – КП-1 и КП-2, блокировочных клапанов – КП-9 и КП-10, клапанов регенерации – КП-3 и КП-4, клапанов повышения давления – КП-6 и КП-8.

Осушенный воздух из адсорбера АД-1 или АД-2 направляется на противопылевой фильтр Ф-2, где очищается от возможной пыли адсорбента, выносящегося с потоком осушенного воздуха.

После прохождения противопылевого фильтра предварительно очищенный воздух с точкой росы минус 80 °С направляется в доохладитель ПО-2, оснащенный вентилятором, где охлаждается до 37 °С, обеспечивая необходимые параметры для подачи в холодильный контур. Часть охлажденного потока отводится для использования в качестве инструментального воздуха системы.

Основной поток поступает в первичный теплообменник ТО-1, где охлаждается за счет теплообмена с насыщенной смесью из кубовых зон основной (РК-1) и вспомогательной (РК-2) ректификационных колонн, а также с неочищенным азотом из конденсатора КД-2. ТО-1, выполненный из паяного алюминия в виде пластинчато-ребристой конструкции, разделен на «теплую» и «холодную» секции. В «теплой» секции взаимодействуют три потока: воздух, направляемый в РК-1 и турбодетандер ТД-1; чистый азот из РК-1; неочищенный азот из КД-2.

После ТО-1 35 % воздушного потока проходит через турбодетандер ТД-1 и подается в нижнюю часть РК-2. Оставшиеся 65 % охлаждаются в теплообменнике Т-1 и поступают в куб основной колонны РК-1. Такое разделение оптимизирует температурный режим ректификации и минимизирует энергозатраты на охлаждение. Конструкция ТО-1 обеспечивает эффективный теплообмен между потоками, сохраняя стабильность работы всей системы.

Параметры главной ректификационной колонны Р-1:

- количество тарелок: 46;
- рабочее давление: не выше 0,87 МПа;
- рабочая температура: от минус 165,55 °С до минус 170,6 °С.

Холодный чистый воздух из теплообменника Т-1 поступает в нижнюю часть главной ректификационной колонны РК-1 и поднимается через контактные устройства вверх по колонне навстречу жидкости, стекающей вниз из верх-

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

ней части колонны. Поскольку температура кипения азота ниже, чем у кислорода, азот большей своей частью кипит вне жидкости. Кислород, наоборот, большей частью конденсируется в жидкости, стекающей вниз. Пар, достигший вершины колонны, представляет собой чистый газообразный азот. Большая часть паров азота из верхней части главной ректификационной колонны поступает в теплообменник главного конденсатора КД-1, где конденсируется под действием кипящей азото-воздушной смеси.

Поскольку температура кипения азота меньше, чем у кислорода (и, следовательно, у насыщенной смеси), азот не может конденсироваться при взаимодействии с насыщенной смесью в конденсаторе, если они оба находятся при одном и том же давлении. Чтобы насыщенная смесь закипела необходимо, чтобы температура азота была выше температуры смеси. Данная проблема решается за счет уменьшения давления в испарителе. В теплообменнике давление составляет около 0,93 МПа, а в испарителе в свою очередь – 0,58 МПа.

Оставшаяся часть газообразного азота, произведенного в верхней части колонны, направляется в качестве продукта в теплообменник ТО-1 для теплообмена с поступающим воздухом и затем отправляется на дожимные компрессоры, где компримируется с давления 0,8 МПа до давления нагнетания – 13 МПа. С нагнетания дожимных компрессоров азот поступает на заполнение ресиверов. Ресиверы азота используются для обеспечения запаса азота в случае пикового потребления или неисправности установки получения азота. Небольшая часть производственного азота используется продувки холодильной камеры.

Степень чистоты азота в верхней секции главной ректификационной колонны поддерживается за счет отбора газообразного продукта. Для повышения чистоты азота клапан произведенного азота КП-13 незначительно перекрывают, уменьшая количество отбираемого продукта. И наоборот, если необходимо понизить чистоту – увеличивают степень открытия клапана отбора.

Жидкий азот, образовавшийся в процессе конденсации в главном конденсаторе КД-1, возвращается в верхнюю секцию главной колонны в качестве

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

жидкости орошения вместе с жидким азотом, подаваемым технологическим насосом Н-1. Оставшаяся часть подается во вспомогательный конденсатор КД-2 через регулирующий клапан КП-11 и частично сбрасывается в дренажный испаритель ДИ-1.

Азото-воздушная смесь (кубовая жидкость) непрерывно отводится с низа главной ректификационной колонны РК-1, охлаждается в ТО-1 и направляется в главный конденсатор КД-1. Скорость подачи жидкой смеси в главный конденсатор контролируется для поддержания постоянного уровня жидкой смеси в главной колонне в пределах от 30 % до 70 %.

Часть кубовой жидкости сбрасывается в дренажный испаритель ДИ-1 для поддержания уровня куба колонны РК-1.

В емкости главного конденсатора часть азото-воздушной смеси испаряется. Образовавшаяся равновесная газожидкостная смесь расширяется и поступает в нижнюю часть вспомогательной колонны под давлением около 0,37 МПа. Уровень жидкости в конденсаторе поддерживается постоянным в границах от 60 % до 90 % и регулируется клапаном КП-12.

Параметры вспомогательная ректификационная колонна К-2

- количество тарелок: 32;
- рабочее давление в колонне: не выше 0,3 МПа;
- рабочая температура: не выше минус 177,1 °С.

Вспомогательная колонна обеспечивает генерацию дополнительного объема жидкого азота, необходимого для орошения основной колонны РК-1. В ее нижнюю секцию поступает парогазовая смесь из главного конденсатора КД-1 совместно с охлажденным воздухом от турбодетандера ТД-1. Поток газов движется вверх через перфорированные тарелки, контактируя со стекающей жидкостью из верхней зоны колонны.

Газообразный азот, достигший верхней тарелки, переходит во вспомогательный конденсатор КД-2 для сжижения. Часть полученного жидкого азота (до 0,87 МПа) направляется в верхнюю часть колонны, усиливая точность фракци-

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

онного разделения и повышая выход целевого продукта. Такая организация процесса оптимизирует тепломассообмен и стабилизирует работу системы в условиях переменных нагрузок.

Кубовая жидкость непрерывно отводится из кубовой части вспомогательной колонны РК-2, охлаждается в ТО-1 и направляется во вспомогательный конденсатор КД-2. Скорость подачи жидкой смеси во вспомогательный конденсатор контролируется для поддержания постоянного уровня жидкой смеси в колонне. Часть кубовой жидкости сбрасывается в дренажный испаритель ДИ-1, где поддержания уровня куба колонны РК-2.

В теплообменнике вспомогательного конденсатора давление составляет около 0,35 МПа, а в испарителе – 0,14 МПа. Практически вся азото-воздушная смесь испаряется. Неочищенный азот направляется в ТО-1 для охлаждения воздуха и переохлаждения насыщенной смеси. Небольшая часть кубовой жидкости отводится на дренажный испаритель, чтобы предотвратить повышение концентрации углеводородов.

Затем неочищенный азот разделяется на два потока. Первый поток направляется в систему предварительной очистки, а второй выбрасывается в атмосферу через глушитель выпуска ГВ-2. Уровень в емкости вспомогательного конденсатора поддерживаться в пределах 80 % до 85 %.

2.3 Описание технологической схемы получения азота высокого, среднего и низкого давления

Технологическая схема получения азота высокого среднего и низкого давления представлена на рисунке 12.

Часть производственного азота с установки получения азота поступает на всас дожимных компрессоров КМ-1 и КМ-2, работающих попеременно, откуда с давлением 13 МПа подается на заполнение ресиверов РС-1, РС-2, РС-3, РС-4, РС-5. Ресиверы азота используются для обеспечения запаса азота в случае пикового потребления или неисправности установки получения азота. Другая часть производственного азота низкого давления поступает в узел коммерческого

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

учета азота НД и оттуда в коллектор азота низкого давления потребителю.

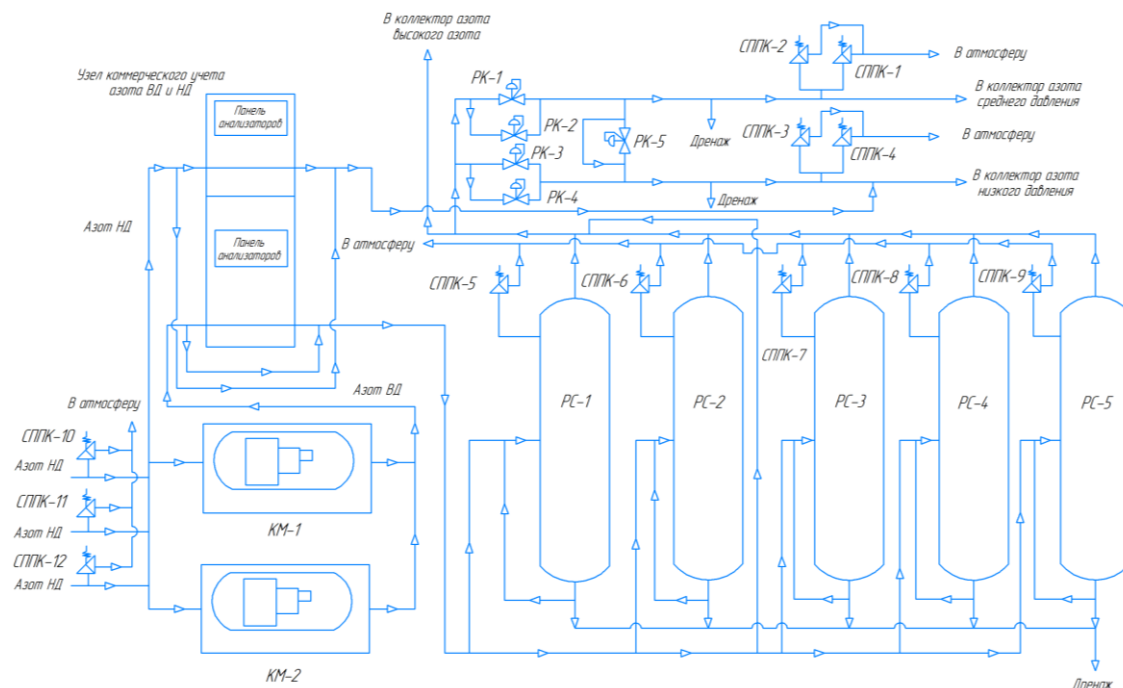


Рисунок 12 – Технологическая схема получения азота высокого, среднего и низкого давления:

КМ-1-2 – дожимные компрессоры; РС-1-2-3-4-5 – ресиверы; СППК-1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12 – сбросные пружинные предохранительные клапаны; РК-1-2-3-4-5 – редуцирующие клапаны

Часть азота ВД после дожимных компрессоров так же подается в узел коммерческого учета, но только азота высокого давления и уже оттуда поступает на заполнение ресиверов.

Установка оснащена сбросными пружинными предохранительными клапанами: СППК-1, СППК-2, СППК-3, СППК-4, СППК-5, СППК-6, СППК-7, СППК-8, СППК-9, СППК-10, СППК-11, СППК-12, предназначенными для сброса азота в атмосферу при возникновении превышения давления в системе.

Одна часть азота высокого давления с ресиверов подается в коллектор азота высокого давления потребителю, вторая часть проходит через редуцирующий клапан РК-1 или РК-2 и с давлением уже 3,6 МПа поступает в коллектор азота среднего давления потребителю, третья часть проходит через редуциру-

ющий клапан РК-3 или РК-4 и с давлением уже 0,9 МПа поступает в коллектор азота низкого давления потребителю.

Существует возможность переброса азота из коллектора азота среднего давления в коллектор азота низкого давления через редуцирующий клапан РК-5.

2.4 Мембранная установка для выделения азота из атмосферного воздуха

Технологическая схема получения азота мембранным методом представлена на рисунке 13.

Атмосферный воздух с температурой от минус 52 °С до 47 °С, проходит входной воздушный фильтр Ф-1 и сжимается в главном воздушном трехступенчатом компрессоре КМ-1 до давления около 0,92 МПа. Чтобы избежать образования льда, который может заблокировать фильтрующие элементы, фильтр входного воздуха оснащен внутренним нагревателем. После стадии компрессии воздух охлаждается в оснащенный вентилятором предохладителе ПО-1 для удаления теплоты сжатия. Избыточная влага, содержащаяся в потоке охлажденного воздуха, удаляется в сепараторе С-1.

Затем охлажденный воздух подается в двухслойную систему предварительной очистки. В блоке очистки воздуха в качестве адсорбента используется слой молекулярных сит и слой активированного оксида алюминия. Адсорберы АД-1 и АД-2 работают периодически. Сначала в одном из них из потока воздуха удаляются оставшийся водяной пар, двуокись углерода, тяжелые углеводороды и некоторые легкие углеводороды, а в другом адсорбере в это время одновременно происходит регенерация неочищенным азотом, предварительно нагретым в регенерационном нагревателе РН-1. Затем адсорберы переключаются согласно заданному временному алгоритму при помощи воздушных клапанов – КП-5 и КП-7, клапанов для продувки и сброса давления – КП-1 и КП-2, клапанов блокировочных клапанов регенерации – КП-9 и КП-10, клапанов регенерации – КП-3 и КП-4, клапанов повышения давления – КП-6 и КП-8.

Осушенный воздух из адсорбера АД-1 или АД-2 направляется на проти-

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

вопылевой фильтр Ф-2, где очищается от возможной пыли адсорбента, выносящегося с потоком осушенного воздуха. После прохождения через противопылевой фильтр чистый воздух (точка росы минус 80 °С) из секции предварительной очистки с температурой около 37 °С поступает на вход в мембранные модули М-1 и М-2.

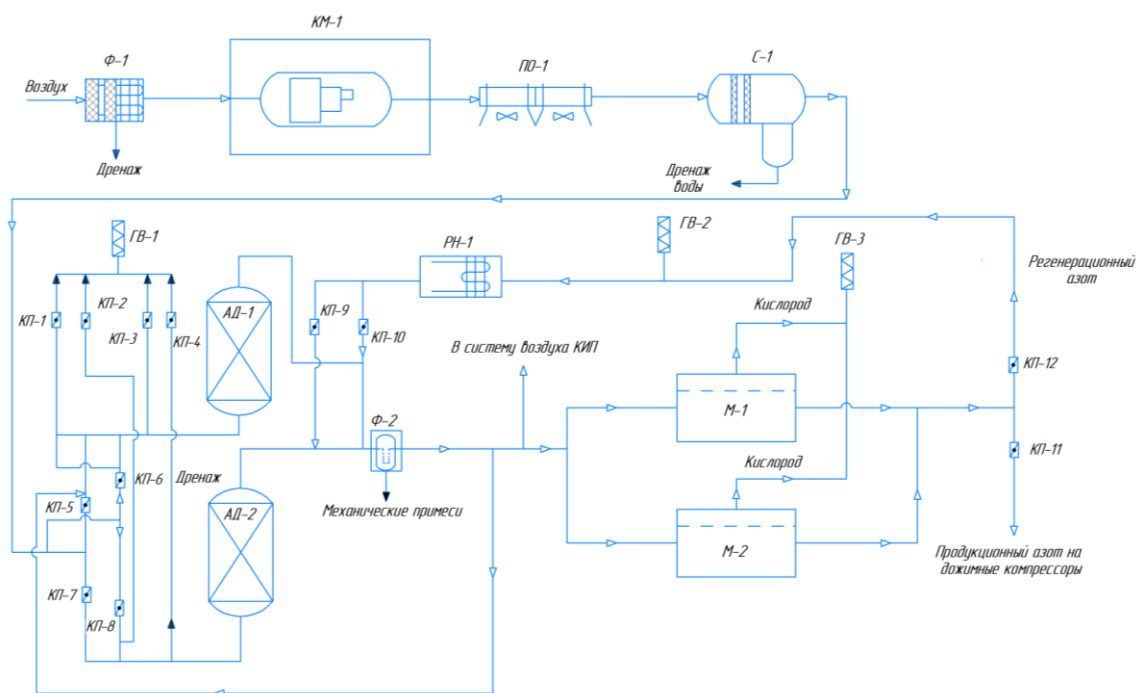


Рисунок 13 – Технологическая схема процесса получения азота из атмосферного воздуха мембранным методом:

Ф-1-2 – входной и противопылевой фильтры; КМ-1 – главный воздушный трехступенчатый компрессор; С-1 – сепаратор; КП-1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12 – клапаны; ПО-1 – переохладители; АД-1-2 – адсорберы; ГВ-1-2-3 – глушители выпуска; РН-1 – регенерационный нагреватель; М-1-2 – мембранные модули

Трудно проницаемый азот проходит по всей длине мембранного модуля и с чистотой 99,5 % через патрубок мембранного газоразделительного блока поступает на дожимные компрессоры, где компримируется с давления 0,8 МПа до давления нагнетания – 13 МПа. С нагнетания дожимных компрессоров азот поступает на заполнение ресиверов. Ресиверы азота используются для обеспе-

чения запаса азота в случае пикового потребления или неисправности установки получения азота. Оставшаяся часть полученного азота направляется в систему предварительной очистки. Кислород, обладающий лучшей проницаемостью через полимерную мембрану, в качестве пермиата отводится из мембранного модуля через один из выходных патрубков и сбрасывается в атмосферу через глушитель выпуска ГВ-3.

Перед началом моделирования технологической схемы необходимо выполнить предварительные расчеты для определения ключевых параметров мембранной установки, предназначенной для получения азота из атмосферного воздуха [36].

Исходные данные для расчета:

Содержание азота в атмосферном воздухе – 78,09 % мол.;

Содержание азота в пермеате – 6,41 % мол.;

Масса подаваемого влажного воздуха – 49089 кг/ч;

Толщина мембраны – 0,1 мкм;

Давление до мембраны – 0,92 МПа;

Температура – 45 °С.

Для проектирования мембранной системы выделения азота критически важны расчеты двух ключевых параметров: площади рабочей поверхности мембраны и ее удельной производительности. В основе вычислений лежит уравнение массопередачи, связывающее эти величины с физическими характеристиками процесса.

Мембранное разделение газа основано на законах массопередачи.

Массовый поток Q вещества определяется по следующему уравнению:

$$Q = \frac{K_M \cdot S \cdot \Delta P}{d}, \quad (1)$$

где Q – количество вещества, проходящего через мембрану, кг/ч;

S – рабочая поверхность мембраны, м²;

K_M – коэффициент проницаемости по азоту, (моль·м)/(м²·с·Па);

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

d – толщина выбранной мембраны, мкм;

ΔP – движущая сила процесса мембранного разделения, кПа.

Из формулы (1) определим рабочую поверхность мембраны:

$$S = \frac{K_M \cdot Q \cdot \Delta P}{d}, \quad (2)$$

Коэффициент проницаемости по азоту K_M при переносе через мембрану равен $3,9 \cdot 10^{-14}$ (моль·м)/(м²·с·Па).

Определим движущую силу мембранного разделения систем:

$$\Delta P = P_1 - P_2, \quad (3)$$

где P_1 – рабочее давление до мембраны, кПа;

P_2 – избыточное давление после мембраны, кПа.

$$\Delta P = 920 - 800 = 120 \text{ кПа}$$

Тогда рабочая поверхность мембраны:

$$S = \frac{49089 \cdot 3,9 \cdot 10^{-14} \cdot 120}{1 \cdot 10^{-7}} = 2,30 \text{ м}^2$$

Принимаем поверхность мембраны $S = 5 \text{ м}^2$.

Удельная производительность мембраны согласно по формуле:

$$G = \frac{V}{S}, \quad (4)$$

где V – объемный расход пермеата, м³/ч;

S – поверхность мембраны, м².

Плотность пермеата будет складываться из плотности кислорода и азота.

Плотность пермеата составляет 1,416 кг/м³.

Массовый расход пермеата – 11290,47 кг/ч.

Тогда объемный расход пермеата:

$$V = \frac{M}{\rho}, \quad (5)$$

где M – массовый расход пермеата, м³/ч;

ρ – плотность пермеата, кг/м³.

$$V = \frac{11290,47}{1,416} = 7973,5 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Удельная производительность мембраны:

$$G = \frac{7973,5}{5} = 1594,7 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Тогда количество мембран для азотной установки равно:

$$n = \frac{Q}{G}, \quad (6)$$

$$n = \frac{49089}{1597,7} = 30,78$$

Принимаем количество мембран $n = 33$.

2.5 Моделирование и расчет криогенной и мембранной установок по получению азота из атмосферного воздуха

Для анализа эффективности криогенного и мембранного методов генерации азота выполнено компьютерное моделирование и расчеты в программном обеспечении, позволяющем проектировать установки, оптимизировать рабочие режимы, определять размеры оборудования и параметры материальных потоков. Исходным сырьем выступает атмосферный воздух с температурой 0 °С и давлением 0,92 МПа, детальный состав которого приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Состав атмосферного воздуха, поступающего на установку

Компонент	Химическая формула	% объем.	% мол.	% масс.
Азот	N ₂	78,0811635	77,0918446	74,4533817
Кислород	O ₂	20,9465000	21,9628963	24,2417856
Аргон	Ar	0,9389798	0,9129696	1,2580376
Двуокись углерода	CO ₂	0,0305989	0,0296159	0,0449812
Неон	Ne	0,0018796	0,0018009	0,0012292
Криптон	Kr	0,0005299	0,0005589	0,0003362
Гелий	He	0,0001198	0,0001213	0,0000749
Ксенон	Xe	0,0000087	0,0000062	0,0000880
Метан	CH ₄	0,0001599	0,0001242	0,0000813
Водород	H ₂	0,0000599	0,0000621	0,0000043
Итого	—	100	100	100

Массовый расход атмосферного воздуха составляет 49089 кг/ч.

Данные исходного материального потока представлены на рисунке 14.

Материальный поток: После К-1				
Таблица		Вложения	Динамика	
Таблица		Название потока	После К-1	Паровая фаза
Условия	Паровая / фазовая фракция		1,0000	1,0000
Свойства	Температура [C]		36,00	36,00
Состав	Давление [bar]		90,00	90,00
Подача нефти и газа	Мольный расход [kgmole/h]		1687	1687
Проба нефтепродукта	Масс. расход [kg/h]		4,909e+004	4,909e+004
Конст. равн.	Станд. объем. расх. ид. жидк. [barrel/day]		8441	8441
Пользов.перемен.	Молярная энтальпия [kJ/kgmole]		-364,9	-364,9
Прим.	Молярная энтропия [kJ/kgmole-C]		114,4	114,4
Парам. стоим.	Тепловой поток [kW]		-171,0	-171,0
Нормализ. выходы	Объем. расх. жидк. при станд. усл. [barre		6,017e+006	6,017e+006
Выбросы	Пакет флюида		Basis-1	
	Тип утилиты			

Рисунок 14 – Показатели материального потока атмосферного воздуха после компрессора К-1

Модель криогенной установки получения азота из атмосферного воздуха представлена на рисунке 15.

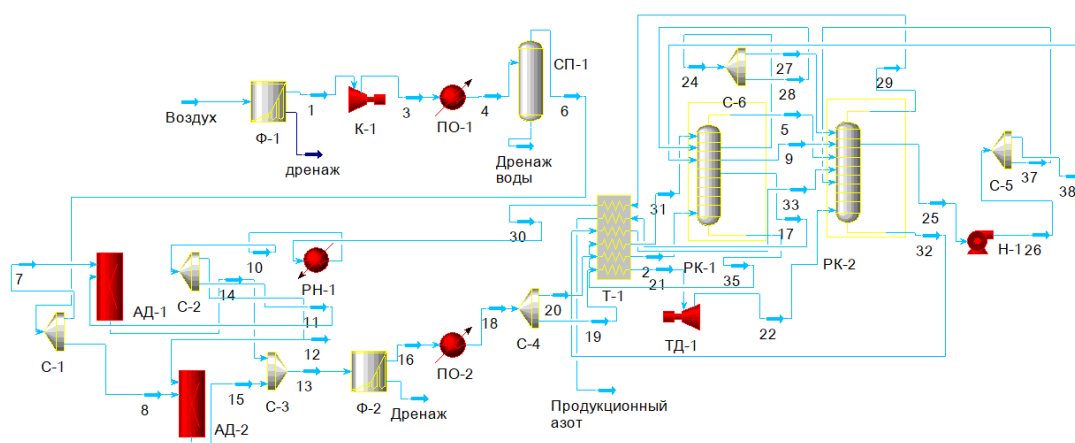


Рисунок 15 – Схема установки криогенного получения азота из атмосферного воздуха

Баланс материальных потоков криогенной установки получения азота отображен в таблице 6.

Таблица 6 – Баланс материальных потоков криогенной азотной установки

Приход			Расход		
Сырье	% мол.	кг/ч	Продукт	% мол.	кг/ч
Атмосферный воздух	100,00	49089,00	Газообразный азот	46,30	22728,00

Приход			Расход		
			Неочищенный азот	45,97	22566,00
			Вода	1,47	720,00
			Потери	6,26	3075,00
Итого	100,00	49089,00	Итого	100,00	49089,00

Составы потоков приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Состав потоков

Компонент	Поток, % мол.	
	Газообразный азот	Неочищенный азот
Азот	99,60	59,91
Кислород	0,40	40,09
Аргон	0,00	0,00
Двуокись углерода	0,00	0,00
Неон	0,00	0,00
Криптон	0,00	0,00
Гелий	0,00	0,00
Ксенон	0,00	0,00
Метан	0,00	0,00
Водород	0,00	0,00
Итого	100,00	100,00

Модель мембранного варианта установки получения азот из атмосферного воздуха приведена на рисунке 16.

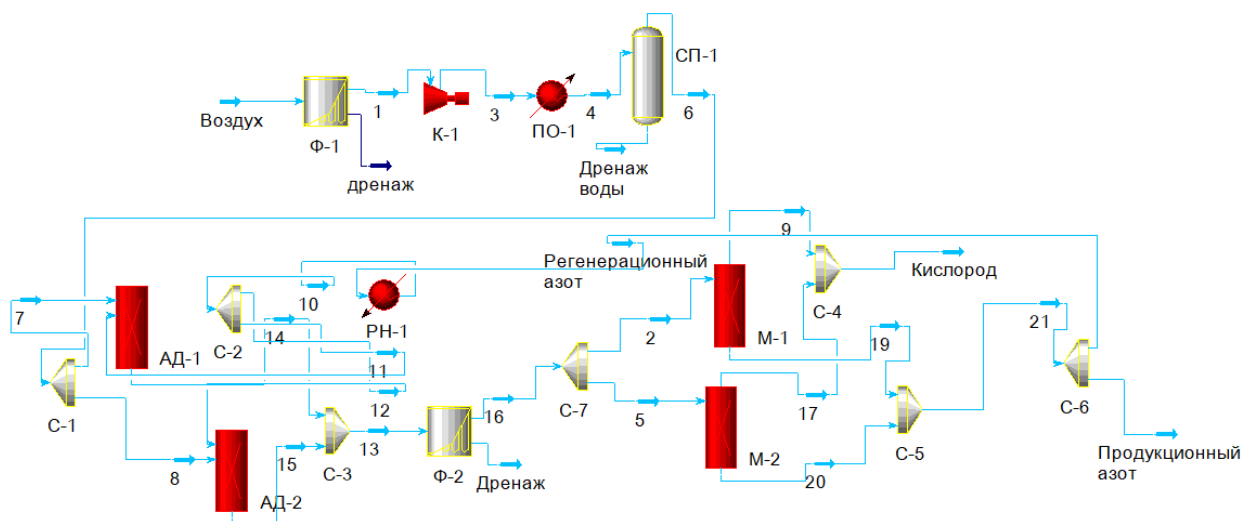


Рисунок 16 – Схема установки мембранного получения азота из атмосферного воздуха

Теперь необходимо выполнить расчет материального баланса мембранной установки [37].

Баланс материальных потоков мембранного процесса имеет вид:

$$L_0 = L + W, \quad (7)$$

где L_0 – расход атмосферного, кг/ч, принимаем 49089 кг/ч;

L – расход ретанта, кг/ч;

W – расход пермеата, кг/ч.

Материальный баланс по компоненту определяется по формуле:

$$L_0 \cdot c_0 = L \cdot c_1 + W \cdot c_2, \quad (8)$$

где c_0 – концентрация азота в исходном потоке, % мол.;

c_1 – концентрация азота в ретанте, % мол.;

c_2 – концентрация азота в пермеате, % мол.

Содержание азота в исходном потоке воздуха принимаем равным 77,0918446 % мол.

Содержание азота в пермеате должно составлять 99,500 % мол. Содержание азота в ретанте составляет 6,41 % мол.

Выход пермеата рассчитывается по следующей формуле:

$$W = L_0 - L, \quad (9)$$

Подставим уравнение (9) в формулу (8), тогда уравнение материального баланса имеет вид:

$$L_0 \cdot c_0 = L \cdot c_1 + (L_0 - L) \cdot c_2, \quad (10)$$

Получаем:

$$L_0 \cdot c_0 = L \cdot c_1 + L_0 \cdot c_2 - L \cdot c_2$$

$$L_0 \cdot c_0 - L_0 \cdot c_2 = L \cdot c_1 - L \cdot c_2$$

$$L_0(c_0 - c_2) = L(c_1 - c_2)$$

$$L = \frac{L_0(c_0 - c_2)}{(c_1 - c_2)}$$

Тогда расход ретанта составляет:

$$L = \frac{49089 \cdot (0,7709 - 0,0641)}{(0,9950 - 0,0641)} = \frac{49089 \cdot (0,7068)}{0,9309} = \frac{34696,1052}{0,9309} = 37\,272 \text{ кг/ч}$$

Выход пермеата:

$$W = 49089 - 37272 = 11817 \text{ кг/ч}$$

Корректность материального баланса системы подтверждается соблюдением балансового уравнения, связывающего входные, выходные и аккумулированные потоки вещества (7):

$$49089 = 37272 + 11817 \text{ кг/ч}$$

$$49089 = 49089 \text{ кг/ч}$$

Все рассчитано верно.

Баланс материальных потоков мембранной установки приведен в таблице 8.

Таблица 8 – Баланс материальных потоков мембранной азотной установки

Приход			Расход		
Сырье	% мол.	кг/ч	Продукт	% мол.	кг/ч
Атмосферный воздух	100,00	49089,00	Азот	75,93	37272,00
			Кислород	24,07	11817,00
Итого	100,00	49089,00	Итого	100,00	49089,00

Составы потоков после мембранного модуля приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Состав потоков

Компонент	Поток, % мол.	
	Ретант	Пермеат
Азот	99,50	6,41
Кислород	0,50	93,59
Аргон	0,000	0,000
Двуокись углерода	0,000	0,000
Неон	0,000	0,000
Криптон	0,000	0,000
Гелий	0,000	0,000
Ксенон	0,000	0,000
Метан	0,000	0,000
Водород	0,000	0,000
Итого	100,000	100,000

Поскольку концентрация азота в ретанте не соответствует нормативным показателям, установленным для криогенных азотных систем (технический регламент), можно заключить, что мембранные установки демонстрируют более низкую эффективность в сравнении с криогенными аналогами. Это подтверждает превосходство криогенной технологии в обеспечении требуемых параметров чистоты продукта.

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ АЗОТА

Для сопоставления мембранных и криогенных азотных установок проведен анализ капитальных затрат на их строительство, основанный на актуальных рыночных ценах оборудования и данных аналогично реализованных проектов. Также приведена приблизительная стоимость 1 м³ азота, полученного каждым из методов. Результаты оценки охватывают как первоначальные вложения в инфраструктуру, так и долгосрочные затраты, связанные с энергоэффективностью, обслуживанием и ресурсом ключевых компонентов [38-40].

3.1 Оценка капитальных затрат

Капитальные расходы представляют собой единовременные инвестиции, направленные на приобретение ключевого оборудования, пусконаладочные работы и ввод объекта в эксплуатацию. В таблице 10 приведен расчет затрат на сооружение криогенной установки для получения азота, а в таблице 11 – аналогичные данные для мембранной системы. Оба варианта включают стоимость основного и вспомогательного оборудования, монтажных работ, а также затраты на проектирование и наладку технологических процессов.

Таблица 10 – Капитальные затраты на строительство криогенной установки

Наименование оборудования / работ	Стоимость, тыс. руб. без НДС
Воздушный центробежный компрессор (1 шт.)	93 166,0
Предохладитель воздуха (1 шт.)	9 613,0
Подогреватель газа регенерации (1 шт.)	27 950,0
Фильтр-пылеуловитель (1 шт.)	4 500,0
Криогенный теплообменник (1 шт.)	46 580,0
Ректификационная колонная (2 шт.)	372 667,0
Конденсатор (2 шт.)	37 260,0
Доохладитель воздуха (1 шт.)	9 613,0
Сепаратор (1 шт.)	7 500,0
Адсорбер (2 шт.)	74 500,0

					ВКР.245947.180301.ПЗ					
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						
Разраб.		Сергеева А.В.			Анализ методов получения азота на примере Амурского газоперерабатывающего завода			Лит.	Лист	Листов
Провер.		Гужель Ю.А.						У	48	68
Реценз.								АмГУ ИКиИН 1107-об гр.		
Н. Контр.		Родина Т.А.								
Утверд.		Гужель Ю.А.								

Продолжение таблицы 10

Наименование оборудования / работ	Стоимость, тыс. руб. без НДС
Входной фильтр с подогревом (1 шт.)	4 660,0
Турбодетандер (1 шт.)	46 580,0
Насос (1 шт.)	9 316,0
Дренажный испаритель (1 шт.)	1 860,0
ИТОГО, оборудование:	745 765,0
Монтаж и пусконаладка	145 066,0
Проектирование и разработка документации	74 000,0
Автоматизация	111 000,0
ИТОГО за 1 технологическую линию:	1 075 831,0
ИТОГО вся установка:	3 227 493,0

Таблица 11 – Капитальные затраты на строительство мембранной установки

Наименование оборудования / работ	Стоимость, тыс. руб. без НДС
Воздушный центробежный компрессор (1 шт.)	93 166,0
Предохладитель воздуха (1 шт.)	9 613,0
Подогреватель газа регенерации (1 шт.)	27 950,0
Фильтр-пылеуловитель (1 шт.)	4 500,0
Сепаратор (1 шт.)	7 500,0
Адсорбер (2 шт.)	74 500,0
Входной фильтр с подогревом (1 шт.)	4 660,0
Мембранный модуль (2 шт.)	332 000,0
ИТОГО, оборудование:	553 889,0
Монтаж и пусконаладка	83 060,0
Проектирование и разработка документации	27 600,0
Автоматизация	55 370,0
ИТОГО за 1 технологическую линию:	719 919,0
ИТОГО вся установка:	2 159 757,0

3.2 Оценка эксплуатационных затрат

Эксплуатационные расходы представляют собой постоянные издержки, обеспечивающие повседневное функционирование предприятия. К ним относятся затраты на оплату труда сотрудников, списание стоимости оборудования через амортизацию, потребление электроэнергии и другое.

1) Затраты на электроэнергию

Полное энергопотребление криогенной азотной установки примем равным 7655 кВт · ч, с учетом стоимости электроэнергии для юридических лиц в Амурской области (Свободненский район) в размере 9,6 руб.

Тогда затраты на электроэнергию за год составят:

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

$$З_{эл} = 7655 \cdot t \cdot Ц_{эл}, \quad (11)$$

t – количество рабочих часов установки, ч;

$Ц_{эл}$ – тариф на электроэнергию, рублей.

$$З_{эл} = 7655 \cdot 8845 \cdot 9,2 = 622\,917\,970 \text{ рублей}$$

Для мембранной азотной установки полное энергопотребление примем равным 7655 кВт · ч, с учетом стоимости электроэнергии для юридических лиц в размере 9,6 рубля.

Тогда затраты на электроэнергию за год составят:

$$З_{эл} = 5050 \cdot t \cdot Ц_{эл}, \quad (12)$$

t – количество часов, которое установка находится в работе, ч;

$Ц_{эл}$ – тариф на электроэнергию, рублей.

$$З_{эл} = 5050 \cdot 8845 \cdot 9,2 = 410\,938\,700 \text{ рублей}$$

2) Оплата труда

Для обеспечения заданной и непрерывной работы криогенной азотной установки принят двухсменный график работы для обслуживающего персонала (12-ти часовая рабочая смена) – 20 человек и 8-ми часовой рабочий день для руководящего персонала – 6 человек.

Отсюда заработная плата персонала за год составит:

$$З_{зп \text{ год}} = 12 \cdot Ч_{п} \cdot З_{ср}, \quad (13)$$

где $Ч_{п}$ – численность персонала;

$З_{ср}$ – средняя заработная плата, рублей.

$$З_{зп \text{ год}} = 12 \cdot 26 \cdot 100\,000 = 31\,200\,000 \text{ рублей}$$

Для мембранной азотной установки затраты на заработную плату персонала составят также 31 200 000 рублей.

3) Оценка амортизационных отчислений

Амортизация – это процесс постепенного переноса стоимости основных фондов на себестоимость выпускаемой продукции в связи с их физическим износом или технологическим устареванием. Согласно российскому налоговому законодательству, амортизации подлежат активы стоимостью более 100 000

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

рублей, находящиеся в собственности организации. Для упрощения расчетов приняты усредненные сроки эксплуатации:

– для криогенного оборудования (таблица 15) – от 25 до 30 лет (300 – 360 месяцев);

– для мембранных систем (таблица 16) – от 15 до 25 лет (180 – 300 месяцев), что соответствует 9-й амортизационной группе по ст. 259.2 НК РФ [40].

В рамках анализа СПИ криогенной установки определен как 330 месяцев, а мембранной – 240 месяцев. Такая дифференциация обусловлена различиями в эксплуатационной нагрузке и скоростью морального старения технологий.

Отсюда норма амортизации криогенной азотной установки за месяц:

$$H_{aj} = \frac{100 \%}{\text{СПИ}}, \quad (14)$$

$$H_{aj} = \frac{100 \%}{300} = 0,003 \%$$

Тогда амортизация криогенной установки за год составит:

$$A_k = \sum K_j \cdot H_{aj} \cdot 12, \quad (15)$$

где K_j – сумма капиталовложений, подпадающая под амортизацию.

$$A_k = 3\,227\,493\,000 \cdot 0,003 \cdot 12 = 116\,189\,748 \text{ рублей}$$

Тогда норма амортизации мембранной азотной установки за месяц по формуле (14):

$$H_{aj} = \frac{100 \%}{240} = 0,004 \%$$

Тогда амортизация мембранной установки по формуле (15) за год составит:

$$A_m = 2\,159\,757\,000 \cdot 0,004 \cdot 12 = 103\,668\,336 \text{ рублей}$$

3.3 Расчет экономической эффективности проекта криогенной азотной установки

Оптовая стоимость 1 м³ азота чистотой 99,9999 %, полученного криогенным методом составляет около 25 рублей.

Чистый дисконтированный доход (NPV) — финансовый индикатор, количественно оценивающий проект через приведение будущих денежных потоков к текущей стоимости с учетом временной стоимости денег. Он отражает ожидаемую чистую прибыль от реализации проекта на конец расчетного периода, интегрируя разницу между дисконтированными доходами и расходами [38-40].

Методология NPV базируется на принципе дисконтирования, который корректирует будущие финансовые потоки с учетом инфляции, рисков и альтернативных инвестиционных возможностей. Это позволяет объективно сравнить текущую стоимость поступлений и выплат, прогнозируемых в течение жизненного цикла проекта, учитывая их динамику и распределение во времени. Таким образом, положительное значение NPV указывает на экономическую целесообразность проекта, а отрицательное – на его убыточность.

NPV определяется по формуле:

$$NPV = \sum_{T=0}^{T_{расч}} CF_T \cdot K_{Di}, \quad (16)$$

где $T_{расч}$ – расчетный период, год. Принимаем равным 10 годам;

CF_T – поток платежей в период T_i с учетом начальных инвестиций, руб.;

i – ставка дисконтирования, %. Примем ставку дисконтирования в размере 25 % (кредит у коммерческого банка), так как текущая ключевая ставка Центрального Банка РФ равна 21 %.

Таким образом, коэффициент дисконтирования для разных периодов:

$$K_{Di} = \frac{1}{(1+i)^{T_{расч}}},$$

$$K_{D0} = \frac{1}{(1+0,21)^0} = 1$$

$$K_{D1} = \frac{1}{(1+0,21)^1} = 0,83$$

$$K_{D2} = \frac{1}{(1+0,21)^2} = 0,68$$

$$K_{Д3} = \frac{1}{(1+0,21)^3} = 0,56$$

$$K_{Д4} = \frac{1}{(1+0,21)^4} = 0,47$$

$$K_{Д5} = \frac{1}{(1+0,21)^5} = 0,39$$

$$K_{Д6} = \frac{1}{(1+0,21)^6} = 0,32$$

$$K_{Д7} = \frac{1}{(1+0,21)^7} = 0,26$$

$$K_{Д8} = \frac{1}{(1+0,21)^8} = 0,22$$

$$K_{Д9} = \frac{1}{(1+0,21)^9} = 0,18$$

$$K_{Д10} = \frac{1}{(1+0,21)^{10}} = 0,15$$

Дисконтированный срок окупаемости (DPP) – показатель, определяющий период времени, необходимый для того, чтобы чистый дисконтированный доход (NPV) проекта достиг положительного значения, что означает переход от этапа инвестиционных затрат к этапу генерации прибыли [38-40].

В отличие от простого срока окупаемости, DPP учитывает временную стоимость денег, отражая момент, когда сумма дисконтированных денежных потоков компенсирует первоначальные вложения и последующие затраты.

$$DPP = \sum_{T=0}^{T_{расч}} CF_T \cdot K_{Дi} \geq Z_k, \quad (17)$$

где Z_k – капитальные вложения, руб.

Поток платежей рассчитывается по формуле:

$$CF_T = D_T - Z_k - Z_{экс}, \quad (18)$$

где D_T – общий доход от реализации проекта в год, руб.;

$Z_{экс}$ – общие эксплуатационные издержки в год, руб.

Доходом является стоимость полученного газообразного азота:

$$D_T = C_{N_2} \cdot G_{\text{год}}, \quad (19)$$

где C_{N_2} – стоимость производционного азота, руб./м³;

$G_{\text{год}}$ – производительность криогенной азотной установки, м³/год.

$$D_T = 25 \cdot 159\,201\,183 = 3\,980\,029\,575 \text{ рублей}$$

Тогда эксплуатационные издержки:

$$Z_{\text{экс}} = Z_{\text{эл}} + Z_{\text{к}} + A_{\text{к}}, \quad (20)$$

где $Z_{\text{эл}}$ – затраты на электроэнергию в год, руб.;

$Z_{\text{зп год}}$ – заработная плата персонала за год, руб.;

$A_{\text{к}}$ – амортизационные отчисления по криогенной установке, руб.

$$Z_{\text{экс}} = 622\,917\,970 + 31\,200\,000 + 116\,189\,748 = 770\,307\,718 \text{ рублей}$$

Основные инвестиционные параметры рассчитаны с использованием Microsoft Excel. Установка достигнет проектной мощности только на третьем году эксплуатации после завершения пуско-наладочных этапов. Результаты расчетов, включая ключевые показатели, систематизированы в таблице 12 и визуализированы на рисунке 17.

Таблица 12 – Основные инвестиционные показатели проекта

Показатель	Значение показателя	Условия
NPV, руб.	5 065 851 000	NPV > 0
DPP, год	4	DPP < T _{расч}

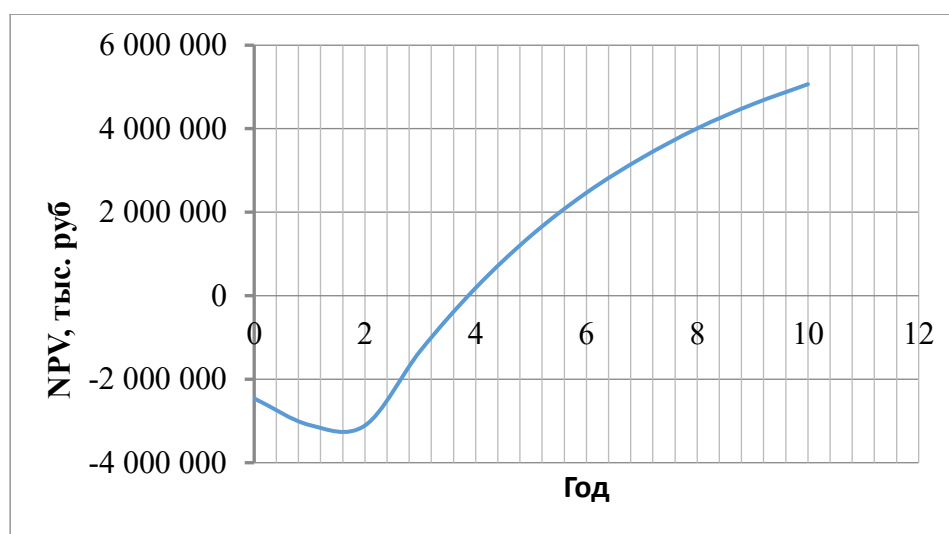


Рисунок 17 – Результаты экономического расчета по криогенному проекту

Анализ данных показывает, что дисконтированный срок окупаемости (DPP) проекта составляет четыре года, а чистая приведенная стоимость (NPV) имеет положительное значение в размере 5 065 851 000 рублей. Учитывая, что проект окупается в течение данного периода и демонстрирует высокую экономическую эффективность, разработанный метод выделения азота из атмосферного воздуха считается экономически целесообразным и рекомендуется к внедрению. Полученные показатели подтверждают рентабельность технологии и ее потенциал для практического применения в промышленных масштабах.

3.4 Расчет экономической эффективности проекта мембранной азотной установки

Оптовая стоимость 1 м³ азота чистотой до 99,5 %, полученного мембранным методом составляет около 13 рублей за 1 м³.

Для сравнения проведем расчет инвестиционных показателей проекта мембранной азотной установки.

По формуле (19) рассчитаем доход:

$$D_T = 13 \cdot 159\,201\,183 = 2\,069\,615\,379 \text{ рублей}$$

Эксплуатационные издержки включают затраты на электроэнергию, зарплату персонала и амортизационные отчисления.

Тогда эксплуатационные издержки по формуле (20):

$$Z_{\text{экс}} = 410\,938\,700 + 31\,200\,000 + 103\,668\,336 = 545\,807\,036 \text{ рублей}$$

Анализ ключевых инвестиционных параметров реализован в программе Microsoft Excel. Предполагается, что капитальные затраты распределяются равномерно в течение семилетнего периода. Итоговые значения финансовых индикаторов, включая дисконтированные денежные потоки и срок окупаемости, систематизированы в таблице 13 и визуализированы на рисунке 18.

Таблица 13 – Основные инвестиционные показатели проекта

Показатель	Значение показателя	Условия
NPV, руб.	1 801 861 000	NPV > 0
DPP, год	5	DPP < T _{расч}

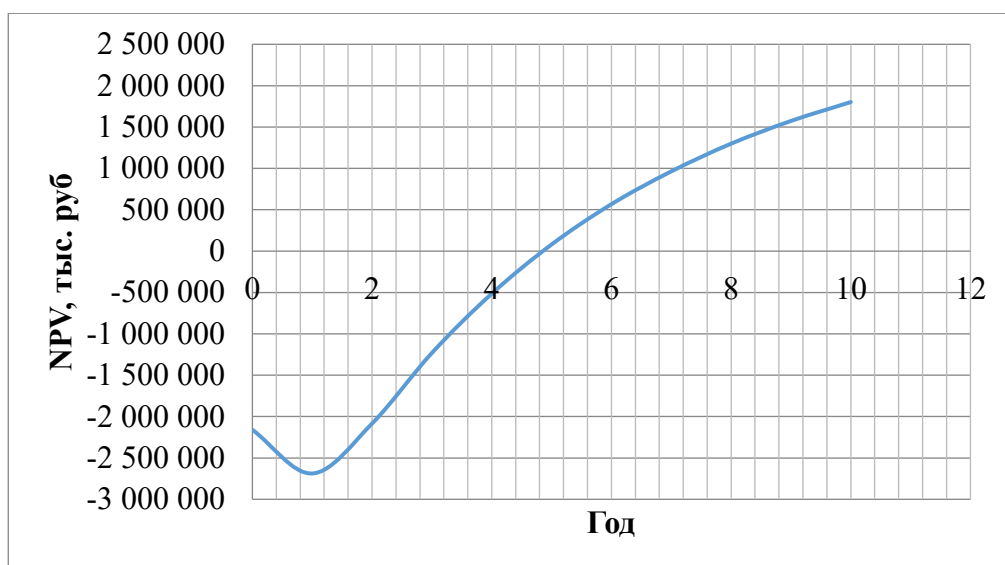


Рисунок 18 – Результаты экономического расчета по мембранному проекту

Анализ графика показывает, что дисконтированный срок окупаемости (DPP) составляет пять лет, что в 1,25 раза превышает аналогичный показатель для криогенной установки. При этом к концу расчетного периода чистая приведенная стоимость (NVP) криогенного проекта оказывается в 2,8 раза выше, чем у мембранного, что подтверждает его экономическую целесообразность, несмотря на более высокие капитальные вложения и энергозатраты.

Таким образом, криогенная технология демонстрирует значительное преимущество в долгосрочной перспективе, компенсируя первоначальные издержки повышенной доходностью.

4 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

4.1 Основные опасные производственные факторы на криогенной азотной установке

На криогенных азотных установках выделяют физические и химические опасные факторы. К физическим рискам относят:

- повышенную концентрацию газов и снижение уровня кислорода в воздухе;
- скопление взрывоопасных примесей в аппаратах и трубопроводах;
- экстремально высокие или сверхнизкие температуры поверхностей оборудования;
- контакт с криогенными продуктами;
- низкую морозоустойчивость конструкций, ведущую к разрушениям;
- избыточный шум, вибрацию, опасное напряжение в электросетях;
- недостаточное освещение;
- движущиеся элементы оборудования;
- нарушение герметичности, приводящее к выбросам углеводородных паров, способных спровоцировать взрывы, пожары или отравления [41].

Химические факторы включают в себя воздействие веществ на человека через дыхательные пути или слизистые (таблица 19), что при несоблюдении норм приводит к травмам, профзаболеваниям или ухудшению здоровья. Отдельные риски могут относиться к нескольким категориям одновременно.

В таблице 14 представлены данные о взрывопожароопасности и токсичности сырья, полупродуктов, готового азота и отходов. Ключевыми критериями являются физиологическое воздействие на человека, а также склонность веществ к воспламенению, детонации или формированию взрывоопасных ком-

					ВКР.245947.180301.ПЗ					
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						
Разраб.		Сергеева А.В.			Анализ методов получения азота на примере Амурского газоперерабатывающего завода			Лит.	Лист	Листов
Провер.		Гужель Ю.А.						У	57	68
Реценз.								АмГУ ИКиИН 1107-об гр.		
Н. Контр.		Родина Т.А.								
Утверд.		Гужель Ю.А.								

бинаций. Используемые материалы классифицируются как 3 и 4 класс опасности по степени влияния на здоровье [40].

Таблица 14 – Характеристика взрывопожароопасных и токсических свойств сырья, полупродуктов, готовой продукции и отходов производств

Наименование	Класс опасности	ПДК	Характеристика токсичности
Атмосферный воздух	-	-	Не токсичен
Азот	4	Не менее 19 % O ₂	Накопление газообразного азота вызывает явление кислородной недостаточности и удушья. Содержание кислорода в воздухе рабочей зоны должно быть не менее 19 % (по объему)
Компрессорное масло	4	300 мг/м ³ (5 мг/м ³ в аэрозольном состоянии)	Малоопасный продукт. Действует в высоких концентрациях на ЦНС. Аэрозоль обладает умеренно раздражающим действием на кожу и глаза, могут вызвать дерматит, экземы
Цеолит	3	2 мг/м ³	Пыль адсорбента в концентрациях, превышающих допустимую, раздражающе действует на слизистую оболочку дыхательных путей, опасна при вдыхании, вызывая фиброзные явления, при длительном поступлении возможно развитие хронических заболеваний

На производственной площадке криогенной азотной установки существуют следующие потенциальные опасности, связанные с особенностями применяемого оборудования и трубопроводов:

- травмирование при нарушении правил охраны труда во время работы с грузоподъемными механизмами;
- поражение электрическим током в случае нарушения заземления электрооборудования, пробоя электроизоляции, неприменения средств защиты;
- термические ожоги при контакте с нагретой поверхностью паропроводов, теплоспутников при повреждении или отсутствии изоляции;
- обморожения при контакте с испаряющимися углеводородами;

– разгерметизация технологической системы с последующим разливом жидких углеводородов и загазованностью взрывоопасными и токсичными парами возможна в следующих случаях:

- разрушение фланцевых уплотнений аппаратов, арматуры, насосов, компрессора и трубопроводов;
- разрушение сальниковых уплотнений арматуры;
- выход из строя компрессора в результате большого осевого сдвига;
- коррозионный износ материала аппаратов, насосов, компрессора и трубопроводов;
- разрушение оборудования вследствие размораживания;
- разрушение трубопроводов из-за вибрации, вызванной гидроударами;
- разрушение оборудования при резких изменениях температуры и давления (во время пуска и останова);
- разрушение отсеченных аппаратов и трубопроводов, содержащих продукты, из-за обогрева теплоспутниками или за счет солнечной радиации;
- взрыв, вызванный перегревом отсеченного участка технологической схемы при пожаре;
- разрушение трубопроводов вследствие внутренних напряжений, вызванных неправильным монтажом или использованием материалов, не соответствующих проекту.

Несмотря на многообразие возможных опасностей, способных возникнуть на криогенной установке по получению азота, одной из самых главных является повышенная загазованность воздуха рабочей зоны, вызванная утечкой азота.

Во-первых, при внезапном выбросе азота в атмосферу при продувке сосудов, работающих под давлением систем, существует опасность удушья вблизи мест выброса, либо в замкнутом пространстве, где возможно перенасыщение азотом и уменьшение содержания кислорода в атмосфере [41, 42].

Нормальное содержание кислорода в воздухе на высоте уровня моря

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист 59
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

балтийской системы координат составляет 21 %. Кислород жизненно необходим для функционирования нашего организма. Распространяющийся азот может незаметно заменить нормальный воздух.

Хотя азот представляет собой нетоксичный и невоспламеняющийся газ, он может вызвать асфиксию на рабочих участках с недостаточной вентиляцией. Легкая гипоксия приводит к глубокому дыханию, учащению пульса и нарушению координации. При повышении гипоксии мыслительная деятельность снижается настолько, что человек не отдает себе отчет в необходимости перейти в хорошо проветриваемую зону. Один полный вдох чистого азота может привести к кислородному голоданию крови и немедленной потере сознания. В случае вдыхания воздуха с содержанием кислорода менее 6 % реакция организма происходит почти мгновенно, что приводит к потере сознания.

Во-вторых, азот – это целевой продукт и его утечка, способна привести к незапланированному останову производства и соответственно значительным экономическим потерям.

В связи с этим были рассмотрены основные коллективные и индивидуальные средства защиты от утечки азота в атмосферу.

4.2 Коллективные и индивидуальные средства защиты при эксплуатации установки

В соответствии с утвержденным приказом Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 29.10.2021 № 766н абсолютно каждый работник должен быть обеспечен полным комплектом средств индивидуальной защиты (СИЗ) [43].

Одним из ключевых элементов СИЗ работника при утечке азота является портативное дыхательное устройство, обеспечивающее возможность экстренной эвакуации работника из зоны загазованности.

Средства индивидуальной и коллективной защиты должны соответствовать ГОСТ 12.4.011-89 «Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация» [44].

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

Помимо средств индивидуальной защиты существуют также меры по коллективной защите персонала.

Основной причиной утечки азота является разгерметизация оборудования. Поэтому для повышения безопасности установки предусмотрены следующие меры:

- расчетное давление аппаратов превышает рабочее;
- оборудование защищается предохранительными клапанами с давлением открытия меньшим, чем расчетное давление;
- система ПАЗ и сигнализации обеспечивает сигнализацию при достижении допустимых значений параметров и автоматическую защиту оборудования;
- в местах возможной загазованности установлены датчики загазованности.

Для обеспечения безопасности на производственных объектах критически важны регулярный контроль сохранности и непроницаемости резервуаров и трубопроводов. Их повреждения могут возникать из-за внезапных скачков давления, температурных колебаний, коррозии, размораживания или некачественного монтажа. Обнаруженные утечки через запорные механизмы требуют немедленного устранения, так как игнорирование приводит к аварийным остановкам, взрывам или отравлениям персонала.

К мерам профилактики аварийной разгерметизации и незапланированных простоев относятся: соблюдение технологических параметров процесса, установка аварийных блокировок, повышение квалификации сотрудников, плановые проверки оборудования под давлением, своевременный ремонт насосов, компрессоров и резервуаров в соответствии с инструкциями производителей, наличие детальных эксплуатационных руководств и ограничение доступа посторонних в производственные зоны.

Для оперативного выявления утечек азота и предотвращения удушья персонала внедрена система мониторинга уровня кислорода в воздухе.

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

Датчики фиксируют концентрацию O_2 , подавая светозвуковые сигналы: предупреждение при 23 % и аварийную тревогу с остановкой оборудования при снижении до 19 %. Сигналы дублируются на местах установки сенсоров и в операторную, отличаясь тональностью и цветовой индикацией.

Дополнительно для минимизации загазованности в помещениях предусмотрена приточная вентиляция. Системы принудительного воздухообмена обеспечивают кратность замены воздуха, регламентированную для конкретных производственных условий.

Воздухозабор производится из зон наименьшей загазованности на высоте не менее 15 м. Приточный воздух подается рассредоточено в рабочую зону.

Также одним из ключевых правил безопасности при эксплуатации криогенной воздухоразделительной установки по получению азота является удаленность на безопасное расстояние точки сброса газа под высоким давлением в атмосферу. То есть сброс должен осуществляться как можно дальше от мест общего доступа и мест прохода людей. По периметру места сброса должны быть установлены ограждения в виде сигнальной ленты и знаков, предупреждающих об опасности [45].

Таким образом, соблюдение мер коллективной и индивидуальной защиты работников позволит обеспечить безопасную и продуктивную работу персонала и минимизирует риски возникновения чрезвычайных ситуаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью выпускной квалификационной работы являлся анализ методов получения азота на примере Амурского газоперерабатывающего завода.

В рамках обобщения материалов изучена техническая документация и научные источники, посвященные методам извлечения азота из атмосферного воздуха. Проведен анализ существующих методов получения азота, выявлены их преимущества и недостатки. Изучена характеристика сырья и готовой продукции, а также технологическая схема Амурского ГПЗ.

Для сравнительной оценки криогенного и мембранного методов использовано программное обеспечение, позволившее смоделировать данные установки и выполнен технико-экономический расчет. По результатам которого выявлено, что приведенная стоимость криогенного проекта в 2,8 раза выше мембранного, а дисконтированный срок окупаемости в 1,25 раза ниже срока окупаемости мембранной установки.

Изучены аспекты воздействия криогенной установки на рабочий персонал, включая меры защиты работников и использование средств индивидуальной и коллективной безопасности.

Выполнены чертежи технологических схем мембранной и криогенной азотных установок, а также схемы получения азота высокого, среднего и низкого давления.

Таким образом, поставленные задачи выполнены, цель работы достигнута. Результаты исследования могут быть использованы на предприятиях химической, нефте- и газоперерабатывающей промышленности при выборе наиболее эффективного метода получения азота с целью оптимизации технологических процессов.

					ВКР.245947.180301.ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					
Разраб.		Сергеева А.В.			Анализ методов получения азота на примере Амурского газоперерабатывающего завода		Лит.	Лист	Листов
Провер.		Гужель Ю.А.					у	63	68
Реценз.							АмГУ ИКиИН 1107-об гр.		
Н. Контр.		Родина Т.А.							
Утверд.		Гужель Ю.А.							

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Амурский газохимический комплекс [Электронный ресурс] : «АГХК». – Режим доступа : <https://amur-gcc.ru/>. – 20.01.2025.

2 Амурский газоперерабатывающий завод [Электронный ресурс]: «АмГПЗ». – Режим доступа: <https://www.gazprom.ru/projects/amur-gpp/>. 20.01.2025.

3 Сенченя, И. Амурский газоперерабатывающий завод. Нетехническое резюме / И. Сенченя, С. Чернова, О. Тertiцкая – М. : Наука, 2018. – 160 с.

4 Пат. RU2354901C1 Российская Федерация, МПК F25J3/00. Способ фракционирования природного газа / С. И. Иванов, В. И. Столыпин, В. И. Столыпин, К. К. Сафронов, С. А. Молчанов и др.; ООО «Газпром добыча Оренбург» – № 2007131613/06 ; Заявл. 20.08.2007 ; Оpubл. 10.05.2009, Бюл. № 13.

5 Столыпин, В. И. Совершенствование процессов получения углеводородов из природного газа на Оренбургском гелиевом заводе : автореф. диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 02.00.13 / В. И. Столыпин. – Уфа : Изд-во Уфимского государственного нефтяного технического университета, 2007. – 24 с.

6 ИТС 50–2017. Издания. Переработка природного и попутного газа; введ. 2018–05–01. – М. : Бюро НДТ, 2017. – 222 с.

7 УфаХим.ру [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ufachem.ru/supply/oilchemistry/pentanehexane>. – 23.01.2025.

8 Фастовский, В. Г. Инертные газы / В. Г. Фастовский, А. Е. Ровинский, Ю. В. Петровский. – М. : Атомиздат, 1972. – 352 с.

9 Голубева, И. А. Свойства и применения гелия, технологии производства из природных газов : моногр. / И. А. Голубева, М. А. Мелешко. – М. : ИЦ РГУ

					ВКР.245947.180301.ПЗ						
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							
Разраб.		Сергеева А.В.			Анализ методов получения азота на примере Амурского газоперерабатывающего завода				Лит.	Лист	Листов
Провер.		Гужель Ю.А.							у	64	68
Реценз.									АмГУ ИКиИН 1107-об гр.		
Н. Контр.		Родина Т.А.									
Утверд.		Гужель Ю.А.									

нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2019. – 83 с.

10 Кузнецова, И. В. Химия азота и его важнейших соединений : моногр. / И. В. Кузнецова, С. С. Хмелев. – Саратов : Саратовский государственный университет, 2000. – 50 с.

11 Некрасов, Б. В. Основы общей химии : моногр. / Б. В. Некрасов. – М. : Химия, 1973. – 656 с.

12 Справочник азотчика: Физико-химические свойства газов и жидкостей. Производство технологических газов. Очистка технологических газов. Синтез аммиака / под ред. Е. Я. Мельников. – М. : Химия, 1986. – 512 с.

13 Ге-пром.ру [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ge-prom.ru/articles/proizvodstvo/azot-v-neftyanoy-promyshlennosti/>. – 25.01.2025.

14 Справочник азотчика. Производство разбавленной и концентрированной азотной кислоты: Производство азотных удобрений: Материалы, компрессоры, газгольдеры производств азотной кислоты и удобрений: Энергоснабжение производств связанного азота и органических продуктов: Техника безопасности производств связанного азота и органических продуктов : моногр. / Н. М. Жаворонков. – М. : Химия, 1987. – 464 с.

15 Воробьев, Н. И. Технология связанного азота и азотных удобрений : моногр. / Н. И. Воробьев. – Минск : Изд-во БГТУ, 2011. – 216 с.

16 Рувики.ру [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.ruwiki.ru/wiki/Кислородная_установка. – 28.01.2025.

17 Гужель, Ю. А. Процессы и аппараты химической технологии: Учебное пособие. Часть третья. Массообменные процессы и аппараты / Ю. А. Гужель. – Благовещенск : Амурский гос.ун-т, 2020. – 145 с.

18 Епифанова, В. И. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения / В. И. Епифанова, Л. С. Аксельрод. – М. : Машгиз, 1993. – 257 с.

19 Микулин, Е. И. Криогенная техника: моногр. / Е. И. Микулин. – М. : Машиностроение, 1969. – 272 с.

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		65

20 Смирнова, Н. Н. Физика. Реальные газы : моногр. / Н. Н. Смирнова. – СПб : Изд-во Национального минерально-сырьевого университета «Горный», 2014. – 25 с.

21 Термодинамические основы разделения воздуха, схемы и аппараты воздухоразделительных установок / под ред. В. И. Епифановой, Л. С. Аксельрода. – М. : Машиностроение, 1964. – 479 с.

22 Лapidус, А. Л. Газохимия : учебник /А.Л. Лapidус, И.А. Голубева, Ф.Г. Жагфаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина, 2013. – 405 с.

23 Основы технологии переработки природного газа и конденсата: учеб. пособие / под ред. Г. В. Тараканова. – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2010. – 192 с.

24 Беляков, В. П. Криогенная техника и технология: моногр. / В. П. Беляков. – М. : Энергоиздат, 1982. – 272 с.

25 Справочник по физико-техническим основам криогеники / под ред. М. П. Малкова. – М. : Энергия, 1973. – 392 с.

26 Свит, Т. Ф. Основы разделения воздуха методом глубокого охлаждения и ректификации : моногр. / Т. Ф. Свит. – Барнаул : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та им. Ползунова, 2005. – 132 с.

27 Рувики.ру [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://ru.ruwiki.ru/wiki/Азотная установка](https://ru.ruwiki.ru/wiki/Азотная_установка). – 01.02.2025.

28 Усюкин, И. П. Установки, машины и аппараты криогенной техники. Часть 1 : моногр. / И. П. Усюкин. – М. : Пищепром, 1996. – 344 с.

29 Вунивере.ру [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://vunivere.ru/work29427>. – 10.02.2025.

30 Мулдер, М. Введение в мембранную технологию : моногр. : пер. с англ. / М. Мулдер. – М. : Мир, 1999. – 514 с.

31 Молотокрус.ру [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://molotokrus.ru/poluchenie-azota-kriogennym-sposobom/>. – 10.02.2025.

32 Дытнерский, Ю. И. Мембранное разделение газов / Ю. И. Дытнерский,

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

В. П. Брыков, Г. Г. Каграманов. – М. : Химия, 1991. – 344 с.

33 Бондаренко, В. Л. Мембранное разделение газовых смесей на основе компонентов воздуха / В. Л. Бондаренко, Н. П. Лосяков, Ю. М. Симоненко // Вестник МГТУ им. Н.Э Баумана. – 2012. – Вып. 41 : Сер. Машиностроение. – С. 20–40.

34 АГС.ру [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://agse.ru/info/poluchenie-gazoobraznogo-azota-metodom-ktsa>. – 15.02.2025.

35 Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий : моногр. / Р. Ш. Абиев [и др.]. – СПб. : НПО «Профессионал», 2006. – 916 с.

36 Амосова, О. Л. Гибридные мембранно-адсорбционные методы разделения многокомпонентных газовых смесей биотехнологии и нефтехимии, содержащих H_2 и CO_2 . / О. Л. Амосова. – М. : Изд-во Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, 2011. – 239 с.

37 Архаров, А. М. Криогенные системы: Основы теории и расчета / А. М. Архаров, И. В. Марфенина, Е. И. Микулин. – М. : Машиностроение, 1988. – 464 с.

38 Мирзабекова, М. Ю. Оценка эффективности инвестиционного проекта / М.Ю. Мирзабекова // Международный научный журнал «Инновационная наука». – 2016. – № 4. – С. 140-143.

39 Теслюк, М. Л. Оценка эффективности инновационного проекта : моногр. / М. Л. Теслюк, А. В. Румянцева. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. – 141 с.

40 Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 158-ФЗ «О внесении изменений в главы 21, 23, 24, 25 и 26 части второй Налогового кодекса Российской Федерации и некоторые другие акты законодательства Российской Федерации о налогах и сборах» // Собр. законодательства Российской Федерации. – 2002. № 30. ст. 3031 ; 2006. № 31 (1 ч.). ст. 3447, ст. 3452.

41 ГОСТ 9293–74. Азот газообразных и жидкий. Технические условия. – Взамен ГОСТ 7.53–86 ; введ. 1976–01–01. – М. : Межгос. совет по стандартиза-

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

ции, метрологии и сертификации ; М. : Стандартиформ, 2007. – 16 с.

42 Справочник азотчика: Физико-химические свойства газов и жидкостей. Производство технологических газов. Очистка технологических газов. Синтез аммиака / под ред. Е. Я. Мельников. – М. : Химия, 1986. – 512 с.

43 Приказ Минздравсоцразвития России от 29.10.2021 № 766н «Об утверждении Межотраслевых правил обеспечения работников специальной одеждой, специальной обувью и другими средствами индивидуальной защиты» // Министерство здравоохранения и социального развития Российской Федерации. – 2021. – 39. – С. 16.

44 ГОСТ 12.4.011-89. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты работающих. Общие требования и классификация. – введ. 1990-07-01. – М. : Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совмине СССР ; М. : ИПК Издательство стандартов, 2001. – 8 с.

45 Докс.снтд.ру [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/420385053>. – 28.04.2025.

					ВКР.245947.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68