

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

Институт инженерных и компьютерных 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
«__» _____ 2025 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Разработка теоретических основ выделения гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты производства Амурского ГПЗ как стратегически важного продукта для экономики

Исполнитель
студент группы 1107-об _____ О.Д. Толмачева
(подпись, дата)

Руководитель
доцент, канд. техн. наук _____ Ю.А. Гужель
(подпись, дата)

Консультант по безопасности
жизнедеятельности _____ А.В. Козырь
доцент, канд. техн. наук
(подпись, дата)

Нормоконтроль
проф, док. хим. наук _____ Т.А. Родина
(подпись, дата)

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 Толмачевой Ольги Денисовны

1. Тема выпускной квалификационной работы: «Разработка теоретических основ выделения гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты производства Амурского ГПЗ как стратегически важного продукта для экономики» утверждена Приказом от 03.04.2025 г № 8786-уч.

2. Срок сдачи студентом законченной работы 19.06.2025 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: Исходный сырьевой поток, % мол.: гелий-4 – 99,99, гелий-3 – 0,007, азот и аргон – 0,0002, кислород – 0,0004, углеводороды – 0,0002, неон – 0,0004, водород – 0,001, углекислый и угарный газ – 0,0003, водяной пар – 0,0005. Производительность по исходной смеси: 3246 тонн в год. Литературные данные. Технологическая документация, нормативная и иная документация.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): Литературный обзор по методам выделения гелия из природного газа. Теоретические основы выделения гелия-3. Характеристика сырья и готовой продукции. Описание технологической схемы установки. Материальный баланс. Расчет ректификационной колонны. Обоснование предлагаемых технических решений. Безопасность и экологичность производства.

5. Перечень материалов графической части: Технологическая схема выделения гелия-3 из товарного гелия Амурского ГПЗ.

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 69 страниц, 7 рисунков, 6 таблиц, 40 источников.

ГЕЛИЙ, МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ИЗОТОПЫ, ГЕЛИЙ-3, СПОСОБ, ТЕХНОЛОГИЯ, ПРОЦЕСС, ВЫДЕЛЕНИЕ, КРИОГЕНИКА, РЕКТИФИКАЦИЯ, СЫРЬЁ, СОСТАВ, РАСЧЕТ, БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

В работе рассмотрены процессы выделения гелия-3 из товарного гелия АмГПЗ, теоретические основы процесса, характеристика сырья и готовой продукции, а также технологическое оформление.

Разработка теоретических основ выделения гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты производства Амурского газоперерабатывающего завода (АГПЗ) является стратегически важной задачей для экономики России. Гелий-3 – редкий и ценный изотоп с уникальными физическими свойствами, который востребован в высокотехнологичных областях, таких как сверхнизкотемпературная техника, ядерно-магнитный резонанс, детекторы радиоактивных материалов и перспективное топливо для термоядерных реакторов. В мире наблюдается дефицит гелия-3, а его промышленное производство ограничено, поскольку основной источник – радиоактивный распад трития – не покрывает растущие потребности.

Амурский ГПЗ, обладая значительными объёмами товарного гелия высокой чистоты, представляет собой перспективную базу для промышленного выделения гелия-3.

					ВКР.248737.180301.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Толмачева О.Д.				Разработка теоретических основ выделения гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты производства Амурского ГПЗ как стратегически важного продукта для экономики	Лит.	Лист	Листов
Провер.	Гужель Ю.А.					у	3	69
Н. контр.	Родина Т.А.					АмГУ ИКиИН 1107-об гр.		
Утверд.	Гужель Ю.А.							

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Общие сведения об Амурском газоперерабатывающем заводе	6
2 История открытия гелия	8
3 Стабильные изотопы гелия	16
4 Методы выделения гелия из природных газов	25
4.1 Криогенный метод выделения гелия	25
4.2 Мембранный метод выделения гелия	30
5 Теоретические основы выделения гелия-3	33
5.1 Анализ источников гелия-3	33
5.2 Термоядерный синтез как источники гелия-3	35
5.3 Анализ методов выделения гелия-3 из товарного гелия	37
5.4 Факторы, влияющие на процесс выделения гелия-3	41
6 Технологическая часть	43
6.1 Характеристика сырья установки	43
6.2 Описание технологической схемы	44
6.3 Расчет материального баланса колонны	47
6.4 Расчет диаметра колонны	52
6.5 Расчет высоты колонны	54
7 Безопасность и экологичность производства	57
7.1 Риски, связанные с производством на криогенной установке	57
7.2 Общая характеристика опасностей на производстве	59
7.3 Средства индивидуальной и коллективной защиты	61
Заключение	64
Библиографический список	65

					ВКР.248737.180301.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Толмачева О.Д.				Разработка теоретических основ выделения гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты производства Амурского ГПЗ как стратегически важного продукта для экономики	Лит.	Лист	Листов
Провер.	Гужель Ю.А.					У	4	69
Н. контр.	Родина Т.А.					АмГУ ИКиИН 1107-об гр.		
Утверд.	Гужель Ю.А.							

ВВЕДЕНИЕ

Гелий-3, редкий изотоп с уникальными свойствами, становится ключевым ресурсом для термоядерной энергетики, квантовых технологий и медицины. Его стратегическая значимость обусловлена потенциалом обеспечения экологически чистой энергии и технологического превосходства. Амурский газоперерабатывающий завод (АГПЗ), крупнейший в России и один из крупнейших в мире производителей гелия.

Он критически важен для создания термоядерных реакторов, где его использование сводит к минимуму радиоактивные отходы. Он также применяется в криогенных системах, МРТ-томографах и космических технологиях. Мировой спрос на этот изотоп растёт, но его запасы на Земле крайне ограничены, что повышает ценность технологий выделения из товарного гелия.

Целью бакалаврской работы является разработка теоретических основ выделения гелий-3 из товарного гелия Амурского газоперерабатывающего завода. Изучение технологической схемы, а также расчет основного оборудования, применяемого на данной установке

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Осуществить подбор и глубокий анализ научно-технической документации литературы по вопросам выделения гелия-3.
2. Изучить предложенную технологическую схему, а также сырье и получаемую продукцию.
3. Выполнить технологический расчет основного оборудования.
4. Рассмотреть основные опасности производства на установке выделения гелия-3 и методы их профилактики, опираясь на требования к безопасности труда.

					ВКР.248737.180301.ПЗ						
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							
Разраб.		Толмачева О.Д			Разработка теоретических основ выделения гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты производства Амурского ГПЗ как стратегически важного продукта для экономики	Лит.		Лист		Листов	
Провер.		Гужель Ю.А.				у		5		69	
Н. контр.		Родина Т.А.				АмГУ ИКиИН 1107-об гр.					
Утверд.		Гужель Ю.А.									

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АМУРСКОМ ГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ЗАВОДЕ

Амурский ГПЗ, расположенный в 15 километрах к северу от города Свободный в Амурской области, является ключевым звеном в поставках газа в Китай по газопроводу «Сила Сибири». Завод перерабатывает газ, поступающий с Чаяндинского (Якутия) и Ковыктинского (Иркутская область) месторождений.

Строительство Амурского ГПЗ, начатое в октябре 2015 года в рамках Восточной газовой программы «Газпрома», предполагает переработку 42 миллиардов кубометров природного газа в год. Для обеспечения работы завода создана развитая инфраструктура, включающая подъездные дороги (27 км), речной причал на реке Зее и железнодорожные пути (около 40 км). На территории завода будет функционировать крупнейшая в мире установка по производству гелия, способная производить до 60 миллионов кубометров в год.

Завод занимает площадь в 800 гектаров. Проект включает в себя строительство автомобильной, железнодорожной и речной инфраструктуры, а также жилого комплекса для 5000 человек. Энергоснабжение завода обеспечивается Свободненской ТЭС (160 МВт), введенной в эксплуатацию в апреле 2021 года. Общий статус реализации проекта строительства Амурского ГПЗ по итогам 2024 года составил 93,15 % [1].

На Амурском ГПЗ, с использованием передовых криогенных технологий, происходит разделение поступающего по газопроводу «Сила Сибири» многокомпонентного газа на различные фракции. Эти фракции затем направляются на дальнейшую переработку и используются в газохимической и других отраслях российской промышленности. Проект предусматривает шесть технологических линий мощностью 7 млрд м³ в год каждая, также три установки очистки

					ВКР.248737.180301.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Толмачева О.Д.				Разработка теоретических основ выделения гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты производства Амурского ГПЗ как стратегически важного продукта для экономики	Лит.	Лист	Листов
Провер.	Гужель Ю.А.					у	6	69
Н. контр.	Родина Т.А.							
Утверд.	Гужель Ю.А.					АмГУ ИКиИН 1107-об гр.		

и сжижения гелия мощностью 20 млн м³ газа в год каждая.

Ввод в эксплуатацию технологических линий Амурского ГПЗ осуществляется поэтапно, в соответствии с развитием добывающих мощностей "Газпрома" в Якутии и Иркутской области. После выхода на полную мощность завод будет ежегодно производить:

- 38 млрд м³ очищенного метана для поставок в Китай;
- 2,4 млн тонн этана;
- 1,5 млн тонн сжиженных углеводородных газов (СУГ);
- 200 тыс. тонн пентан-гексановой фракции;
- 60 млн м³ гелия.

Основным потребителем этана и СУГ, производимых на Амурском ГПЗ, является Амурский газохимический комплекс (совместный проект СИБУРа и Sinoprec). Гелий, производимый на заводе, является важным продуктом, востребованным в высокотехнологичных отраслях промышленности [1].

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

2 ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ГЕЛИЯ

Гелий (He) является химическим элементом, который относится к восьмой группе короткой версии периодической таблицы, соответствующей восемнадцатой группе в длиннопериодной версии. Этот элемент относится к благородным газам, имеет атомный номер 2 и атомную массу 4,002602. В природе существуют два стабильных изотопа: ^4He , который составляет 99,999863 % по объёму, и ^3He , его доля равна 0,000137 %. Гелий встречается в природе редко и образуется при альфа-распаде радиоактивных элементов, таких как уран и торий. Общие запасы гелия в атмосфере, гидросфере и литосфере составляют $5 \cdot 10^{14}$ кубических метров. Его содержание в атмосферном воздухе крайне низкое – $5,27 \cdot 10^{-4}$ % по объёму, в то время как в некоторых природных газах доля гелия может достигать нескольких процентов. В космосе гелий занимает второе место по распространённости после водорода. Ядра атома ^4He называются альфа-частицами и составляют около 30 % (по массе) Солнца и 7 % космических лучей. В 1868 году Пьер Жюль Сезар Жансен и независимо от него английские астрономы Джозеф Норман Локьер и Уильям Хёггинс обнаружили в спектре солнечной короны во время солнечного затмения линии, которые не соответствовали ни одному известному элементу. Локьер назвал новый элемент «гелий» в честь места его находки. Впервые гелий был выделен на Земле в 1895 году Уильям Рамзай совместно с Уильям Крукс при нагревании минерала клевеита [2].

Гелий имеет электронную структуру $1s^2$, что означает, что его атом содержит два электрона на s-орбитали первого энергетического уровня. Он существует в виде отдельных атомов, а не молекул. Гелий обладает исключительной стабильностью, что проявляется в его очень высокой энергии ионизации

					ВКР.248737.180301.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Толмачева О.Д.				Разработка теоретических основ выделения гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты производства Амурского ГПЗ как стратегически важного продукта для экономики	Лит.	Лист	Листов
Провер.	Гужель Ю.А.					у	8	69
Н. контр.	Родина Т.А.					АмГУ ИКиИН 1107-об гр.		
Утверд.	Гужель Ю.А.							

(24,59 эВ) – самой высокой среди всех элементов. Из-за этой стабильности гелий не вступает в химические реакции и не образует соединений.

В обычных условиях гелий представляет собой бесцветный и не имеющий запаха газ с низкой плотностью ($0,178 \text{ кг/м}^3$ при $0 \text{ }^\circ\text{C}$) и плохой растворимостью в воде ($9,78 \text{ см}^3/\text{дм}^3$ при $0 \text{ }^\circ\text{C}$). Он имеет самую низкую температуру кипения среди всех известных веществ (минус $268,93 \text{ }^\circ\text{C}$).

Интересно, что жидкий гелий не переходит в твердое состояние при нормальном атмосферном давлении, даже при самых низких температурах. Для его затвердевания необходимо высокое давление, превышающее $2,5 \text{ МПа}$, при температуре около минус $271,65 \text{ }^\circ\text{C}$.

При охлаждении ниже минус $270,98 \text{ }^\circ\text{C}$ жидкий гелий (He I) претерпевает фазовый переход в состояние He II, которое характеризуется необычными свойствами, такими как аномально высокая теплопроводность и сверхтекучесть. Эти явления были впервые обнаружены Петром Капицей в 1938 году, а затем объяснены Львом Ландау в рамках теории сверхтекучести [3].

На рисунке 1 представлена диаграмма состояния гелия.

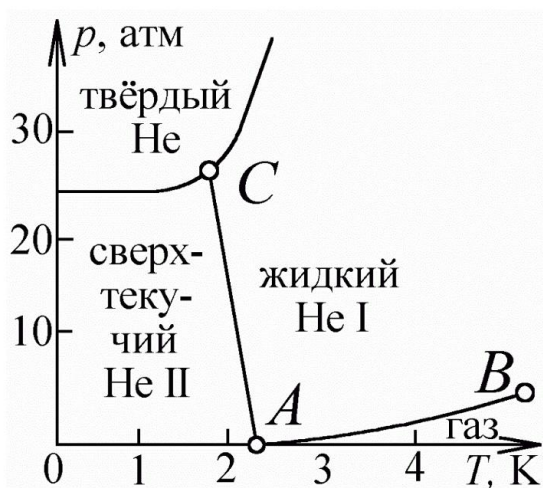


Рисунок 1 – Фазовая диаграмма состояния гелия

В 1851 году, во время затмения, наблюдавшегося в Европе, немецкий астроном Шмидт не только зафиксировал наличие протуберанцев, но и отметил, что их форма меняется в течении времени. На основании этих наблюдений он

предположил, что протуберанцы – это раскаленные газовые облака, выбрасываемые в атмосферу Солнца в результате мощных извержений. Несмотря на это открытие, многие астрономы продолжали сомневаться в реальности огненных выступов, считая их обманом зрения.

До 1860 года существование солнечных протуберанцев оставалось под вопросом. Лишь полное солнечное затмение, произошедшее 18 июля 1860 года и наблюдаемое в Испании, стало переломным моментом. Многие астрономы впервые увидели протуберанцы своими глазами, а итальянский ученый Секки и француз Деларю смогли их запечатлеть не только в рисунках, но и на фотографиях. После этого сомнения в реальности протуберанцев рассеялись.

Несмотря на то, что к 1860 году уже был изобретен спектроскоп – прибор, позволяющий определять состав вещества по его спектру – во время затмения 1860 года никто не догадался использовать его для изучения протуберанцев. О спектроскопе вспомнили лишь после окончания затмения.

Готовясь к следующему солнечному затмению в 1868 году, астрономы обязательно включали спектроскоп в список необходимого оборудования. Мир готовится к полному солнечному затмению, который должен состояться 18 августа 1868 года. Мировое астрономическое сообщество с большим энтузиазмом ожидало затмения, стремясь разгадать природу протуберанцев – ярких образований, видимых вблизи солнца в период полной фазы затмения. Существовали различные теории, объясняющие их происхождение: одни считали их высокими горами на Луне, освещенными солнечным светом, другие – горами на самом Солнце, а третьи – огненными облаками в солнечной атмосфере. Французский ученый Жюль Жансен, отправляясь в Индию, где, по расчетам, были лучшие условия для наблюдения затмения, также взял с собой спектроскоп, чтобы изучить протуберанцы.

Во время полного солнечного затмения, когда Луна полностью заслонила Солнце, французский астроном Жюль Жансен, изучая солнечные протуберанцы с помощью спектроскопа, обнаружил в спектре новую, ярко-желтую ли-

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

нию, помимо известных линий водорода. Эта линия не соответствовала ни одному известному в то время химическому элементу. Независимо от Жансена, аналогичное открытие сделал английский астроном Норман Локиер, работая в Англии.

25 октября 1868 года Парижская академия наук получила два письма: одно от Жюль Жансена из индийского города Гунтур, отправленное сразу после затмения, и другое от Нормана Локиера из Англии, датированное 20 октября [4].

На заседании Академии наук были зачитаны оба письма, в которых Жансен и Локиер независимо друг от друга сообщали об открытии нового «солнечного вещества». Локиер предложил назвать этот элемент, обнаруженный на Солнце с помощью спектроскопа, гелием, от греческого слова «гелиос», означающего «солнце».

Открытие нового химического элемента, подтвержденное независимо разными учеными, вызвало изумление в академических кругах и подчеркнуло его научную обоснованность. В ознаменование этого события была выпущена медаль, посвященная обнаружению вещества в солнечных протуберанцах. На лицевой стороне медали были изображены Жансен и Локиер, а на оборотной – древнегреческий бог солнца Аполлон, управляющий колесницей с четырьмя конями. Под изображением была выгравирована надпись на французском языке, указывающая на дату анализа солнечных выступов: 18 августа 1868 года.

Спустя годы, в 1895 году, лондонский химик Генри Майерс привлек внимание известного физико-химика Уильяма Рамзая к забытой статье геолога Хильдебранда. В этой работе Хильдебранд утверждал, что при нагревании некоторых редких минералов в серной кислоте выделяется негорючий газ, не поддерживающий горение. Одним из таких минералов был клевеит, найденный в Норвегии знаменитым исследователем полярных областей Норденшельдом [4].

Рамзай заинтересовался природой газа, содержащегося в клевейте. Его

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

помощникам с трудом удалось найти и приобрести всего один грамм клевета во всех химических магазинах Лондона, заплатив за него 3,5 шиллинга. Выделив из этого небольшого количества клевета несколько кубических сантиметров газа и тщательно очистив его, Рамзай провел спектральный анализ. Результат оказался поразительным: газ, полученный из клевета, оказался гелием.

Сомневаясь в достоверности своего открытия, Рамзай обратился к авторитетному специалисту в области спектрального анализа, Уильяму Круксу, с просьбой проверить газ, полученный из клевета. Подтверждение Крукса ознаменовало официальное открытие гелия на Земле 23 марта 1895 года, только спустя 27 лет после его обнаружения на Солнце. Рамзай оперативно поделился своим открытием с научным сообществом, отправив сообщения в Лондонское Королевское общество и академику Бертло. Однако, вскоре после этого, шведский химик Ланглэ, независимо от Рамзая, также выделил гелий из клевета и сообщил об этом Бертло. Впоследствии Рамзай обнаружил гелий в атмосфере, выдвинув гипотезу о его происхождении из редких минералов, таких как клеветит.

Гелий, хотя и в малых дозах, присутствует в воде некоторых минеральных источников. Рамзай обнаружил его в источнике Котрэ в Пиренеях, Рэлей – в водах курорта Бат, а Кайзер – в источниках Шварцвальда. Однако, гораздо больше гелия содержится в определенных минералах, таких как самарскит, фергусонит, колумбит, монацит и уранит. Особенно богат гелием минерал торанит с Цейлона: из килограмма нагретого торанита можно извлечь до 10 литров гелия [4].

Впоследствии выяснилось, что гелий обнаруживается только в минералах, содержащих радиоактивные уран и торий. Причина этого в том, что альфа-частицы, испускаемые этими радиоактивными элементами, по сути, являются ядрами атомов гелия.

В настоящее время гелий находит применение в различных сферах:

1. Научные исследования. Применение гелия в научной деятельности

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

подчеркивает его значимость для важных открытий и современных анализов.

Благодаря своей способности достигать крайне низких температур, особенно в жидкой форме, гелий становится ключевым элементом в криогенных технологиях. Жидкий гелий необходим для поддержания сверхпроводников в состоянии, когда их электросопротивление стремится к нулю. Это имеет решающее значение для таких областей, как физика частиц и магнитно-резонансная томография.

Использование ионов гелия в современных методах микроскопии позволяет получать изображения материалов и биологических объектов с повышенной четкостью и сниженным риском повреждений.

Использование гелия для охлаждения сверхпроводящих магнитов в мощных ЯМР-спектрометрах. Это позволяет ученым детально изучать молекулярное строение и динамику разнообразных веществ, что важно для разработки лекарств, исследования материалов и химического анализа.

Гелий также востребован как хладагент для достижения сверхнизких температур и в метеорологии для наполнения зондов. В геологии гелиевое картирование помогает выявлять глубокие разломы и геотермальные источники. Повышенные концентрации гелия в определенных областях могут сигнализировать об аномалиях, заслуживающих дальнейшего исследования. Высокие концентрации этого газа на определённых участках могут указывать на аномалии, представляющие интерес для дальнейшего изучения.

2. Промышленное применение гелия

Гелий — критически важный элемент в ряде промышленных применений, где его уникальные свойства трудно или невозможно воспроизвести с помощью других материалов. Он находит широкое применение в металлообработке и при проведении сварочных работ [5].

Гелий играет важнейшую роль в осветлении цветных металлов в процессах плавки и литья. Подача струи гелия в жидкий металл эффективно устраняет растворенные газы и неметаллические примеси, что способствует произ-

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

водству более чистых и качественных металлических продуктов.

При производстве сплавов на основе магния гелий применяется для формирования защитной среды. Он препятствует возникновению выгорания, которое происходит при взаимодействии расплавленного металла с воздушной средой, что гарантирует получение добротных отливок с наименьшим количеством изъянов.

Гелий незаменим в сварочных методах, в особенности при работе с металлами, склонными к окислению. Он функционирует как защитный газ, формируя инертную среду, которая вытесняет кислород из области сваривания. Это предотвращает окисление и повреждение металла при высоких температурах, гарантируя крепкий и долговечный сварной шов [5].

Гелий имеет существенное значение в обеспечении превосходного качества и длительного срока службы изделий в различных промышленных секторах.

3. Применение гелия в медицине

Сфера применения гелия не ограничивается научными исследованиями и производством. Рассмотрим его значимую роль в области здравоохранения.

Гелий способен поддерживать жизненные функции организма, а именно разбавлять кислород, выступая заменителем азота. Газовые смеси, включающие гелий, эффективно поддерживают дыхание у ряда пациентов.

Используется как терапия респираторных заболеваний. Гелий способствует лучшему проникновению газов в альвеолярные мешочки легких, что делает его полезным инструментом при лечении таких болезней, как астма, хроническая обструктивная болезнь легких и обструкция дыхательных путей. В этих случаях гелий может быть задействован для вентиляции легких [6].

Также занимает важную роль в лапароскопических операциях и хирургии. В определенных оперативных вмешательствах гелий применяется в качестве альтернативы углекислому газу. Помимо этого, при операциях на открытом сердце смесь гелий с кислородом используется для создания «тумана» в лег-

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

ких.

Благодаря своим особым характеристикам, гелий находит применение в магнитно-резонансной томографии (МРТ) для охлаждения сверхпроводящих магнитных систем. Также он используется как индикатор для визуализации и оценки функциональности легких.

4. Применение гелия в искусстве

Благодаря своей малой плотности и негорючести, гелий проник не только в технологические, медицинские и исследовательские области, но и оказал влияние на мир искусства. Этот газ стал источником вдохновения для художников, позволяя им создавать поразительные произведения.

Надувные конструкции — гелий играет важную роль в создании надувных инсталляций. Эти парящие арт-объекты приносят энергию и сказочность в экспозиции, даря зрителям возможность любоваться скульптурами, как будто танцующими в воздухе.

Искусство движения — применение гелиевых шаров совместно с механизмами предоставляет художникам новые возможности, позволяя их работам поистине «оживать». Предметы, заполненные гелием, перемещаются и взаимодействуют с окружающей средой, превращаясь в основу интерактивных инсталляций.

Воздушная фото- и видеосъемка — гелиевые шары открывают уникальные перспективы для съемки с воздуха. Применяя их в качестве подъемных платформ для камер, художники и фотографы могут создавать потрясающие снимки с высоты. Такое использование гелия в искусстве дает возможность аудитории взглянуть на мир под другим углом, открывая прежде скрытые места [7].

Применение гелия в искусстве представляет собой удачное сочетание науки и творчества, давая возможность творческим людям расширять границы своей фантазии и создавать необыкновенные произведения.

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

3 СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ ГЕЛИЯ

Одной из примечательных физических характеристик гелия-3 является его крайне низкая температура, при которой происходит кипение, около 3,2 К (что соответствует минус 269,95 °С). Благодаря этому свойству, он входит в число немногих веществ, сохраняющих газообразное состояние даже при температурах, близких к абсолютному нулю. Если температуру опустить ниже точки кипения, гелий-3 превращается в жидкость, а при дальнейшем охлаждении способен переходить в сверхтекучее состояние. Сверхтекучесть гелия-3 проявляется в полном отсутствии вязкости и способности к самопроизвольному течению, что делает его важным объектом изучения в квантовой механике и физике низких температур [8].

С химической точки зрения, гелий-3 считается инертным газом, который в обычных условиях не вступает в реакции с другими элементами. Это свойство делает его полезным во многих научных и промышленных областях, где требуется стабильная и неактивная среда. Гелий-3 не формирует соединений с другими элементами, что способствует его использованию в передовых технологиях, таких как ядерная физика, медицина и криогеника.

Гелий-3 — это изотоп, наделенный рядом выдающихся свойств. Важно отметить, что он способен участвовать в ядерных реакциях, что делает его потенциальным топливом для будущей термоядерной энергетики. В частности, реакция гелия-3 с дейтерием высвобождает большое количество энергии, что привлекает внимание исследователей, занимающихся альтернативными источниками энергии. Кроме того, гелий-3 находит применение в нейтронных детекторах и как хладагент в определенных моделях МРТ-сканеров.

Уникальная ядерная структура гелия-3, состоящего из двух протонов и од-

					ВКР.248737.180301.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Толмачева О.Д				Разработка теоретических основ выделения гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты производства Амурского ГПЗ как стратегически важного продукта для экономики	Лит.	Лист	Листов
Провер.	Гужель Ю.А.					У	16	69
						АмГУ ИКиИН 1107-об гр.		
Н. контр.	Родина Т.А.							
Утверд.	Гужель Ю.А.							

ного нейтрона, делает его ценным объектом для исследований в ядерной физике и астрофизике. Он может служить своего рода «индикатором» процессов, происходящих внутри звезд, и помогать в изучении условий, существовавших на ранних стадиях развития Вселенной.

Его перспективное применение в передовых технологиях и энергетике стимулирует активные научные изыскания. Более глубокое понимание характеристик и потенциала использования гелия-3 может привести к революционным открытиям в науке и промышленности, способствуя прогрессу инновационных технологий и подходов в различных областях.

Прежде всего, он является высокоэффективным топливом для термоядерного синтеза: всего одна тонна гелия-3 может генерировать столько же энергии, сколько 20 миллионов тонн нефти. Кроме того, гелий-3 экологически безопасен. В отличие от традиционных источников энергии, таких как нефть и уголь, которые загрязняют окружающую среду и имеют ограниченные запасы, гелий-3 не оказывает негативного воздействия на природу. Ядерная энергетика, в свою очередь, страдает от проблемы радиоактивности. Радиоактивность возникает не только в процессе самой ядерной реакции, но и в материалах, используемых в конструкции реактора. В большинстве современных ядерных реакторов образуется поток нейтронов, которые, проникая в материалы, вызывают их радиоактивное заражение и повреждение. Эти материалы и компоненты требуют регулярной замены и утилизации, что приводит к образованию значительных объемов радиоактивных отходов. Однако, в реакции гелия-3 с дейтерием образуются протоны, а не нейтроны. Протоны – заряженные частицы, поэтому они не проникают в материалы и не вызывают их разрушение. В результате, материалы, которые обычно служат 2 – 3 года, при использовании гелия-3 могут прослужить до 30 лет (небольшое количество нейтронов образуется в побочной реакции дейтерий плюс дейтерий: $D + {}^3\text{He} \rightarrow p + {}^4\text{He} + 18,35 \text{ МэВ}$) [9].

Применение гелия-3 в термоядерном синтезе предоставляет значительные

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

преимущества. Во-первых, поток протонов, образующийся в результате реакции, легко преобразуется в электроэнергию, что упрощает конструкцию энергетической установки по сравнению с традиционными реакторами, где требуется сложная система с паровыми котлами и турбинами. Во-вторых, установки на гелий-3 безопасны: они практически не радиоактивны и не взрывоопасны, что делает их устойчивыми к авариям, включая природные катаклизмы и террористические угрозы.

Главная сложность заключается в доступности топлива: гелий-3 в значительных количествах обнаружен только на Луне, где его запасы оцениваются примерно в 1 миллион тонн, что обеспечит человечество энергией на более чем тысячу лет. Энергетическая эффективность гелия-3 впечатляет: одна установка может производить около 10 ГВт электроэнергии в год. Для удовлетворения мировых потребностей потребуется всего 200 тонн гелия-3 ежегодно.

История открытия гелия-3 началась в 1934 году, когда британский физик Марк Олифант впервые получил его искусственно в ходе экспериментов. Однако выделить его в чистом виде тогда не удалось. Лишь в 1939 году американские ученые Луис Альварес и Роберт Корног с помощью масс-спектрометра подтвердили существование гелия-3 в природном гелии, обнаружив его следы в земных образцах. Концентрация гелия-3 в земном гелии крайне мала, составляя около 0,0001 %.

С 1948 года ученые активно изучали гелий-3. Джон Бардин и Джеймс Хартри предположили, что этот изотоп гелия будет обладать необычными свойствами. В 1949 году Альфред Нир впервые смог выделить небольшое количество гелия-3 из природного гелия, используя масс-спектрометр. В 1950-х годах начались исследования сверхтекучести. В отличие от гелия-4, гелий-3 не проявлял сверхтекучесть при обычных температурах. Однако в 1972 году было установлено, что при сверхнизких температурах (ниже 0,003 К) гелий-3 переходит в сверхтекучее состояние. За это открытие физики Дэвид Ли, Дуглас Ошерофф и Роберт Ричардсон были удостоены Нобелевской премии

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

по физике в 1996 году.

Гелий-3, в отличие от своего более распространенного изотопа гелия-4, имеет совершенно другие физические свойства. Они отличаются по атомной массе, температуре кипения, удельной теплоте испарения и плотности в жидком состоянии. Эти уникальные характеристики делают гелий-3 ценным материалом для научных исследований и промышленности, где он находит применение в различных областях:

– Криогеника: для достижения экстремально низких температур, близких к абсолютному нулю (около 0,02 К), используется процесс растворения редкого изотопа гелия-3 в более распространенном гелии-4. Этот метод лежит в основе работы специализированного оборудования, такого как рефрижераторы растворения. Эти устройства находят применение в широком спектре научных исследований, где требуется поддержание очень низких температур, не ограничиваясь только областью криогеники. Охлаждение кубитов в квантовых компьютерах (^3He позволяет достичь 0,01 К) [10].

– Медицина: для визуализации легких традиционно применяются рентгеновские лучи и магнитно-резонансная томография (МРТ). Позволяет получать снимки лёгких с детальной точностью. Однако качество изображений, полученных этими методами, не всегда идеально. В поисках более совершенных способов американские ученые разработали ядерную МРТ с использованием намагниченного газа ксенона-129. Позднее было установлено, что гелий-3, в отличие от ксенона-129, безопасен для человека и позволяет получать изображения с гораздо более высоким разрешением. Преимуществом гелия-3 является также отсутствие необходимости в дорогостоящем обогащении и использовании мощного, сложного оборудования.

– Ядерная физика: гелий-3 обладает высокой способностью поглощать нейтроны, что делает его одним из основных газов, используемых в детекторах нейтронов. Эти детекторы применяются в различных физических экспериментах. Кроме того, детекторы на основе гелия-3 могут использоваться для обна-

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ружения запасов плутония, что способствует усилению мер безопасности и предотвращению незаконной транспортировки материалов для ядерного оружия [10].

Гелий-3 — редкий и ценный изотоп, востребованный в узких, но высокотехнологичных областях: сверхчувствительные приборы, квантовые технологии, медицина и перспективная термоядерная энергетика. Ожидается рост рынка к 2030 — 2040 годам, связанный с развитием термоядерных технологий и расширением их применения в науке, что может увеличить объёмы потребления и стоимость до 400 млн долларов и выше.

Россия обладает значительными запасами природного газа с высоким содержанием гелия. Развитие производства гелия-3 на базе Амурского ГПЗ способно существенно повысить экспортный потенциал страны, создать новые рабочие места и стимулировать развитие высокотехнологичных отраслей. Это позволит России укрепить позиции на мировом рынке гелия, который в настоящее время контролируется странами с крупными месторождениями, такими как Катар и США. Рост производства гелия-3 в регионе будет способствовать экономическому развитию Восточной Сибири и интеграции региона в глобальные цепочки поставок высокотехнологичной продукции.

Амурский газоперерабатывающий завод — один из крупнейших в мире производителей гелия. Высокая концентрация гелия в добываемом газе и современные технологии переработки позволяют производить товарный гелий высокой чистоты, из которого можно выделить гелий-3. Это создаёт уникальные возможности для России стать ведущим поставщиком гелия-3 на мировой рынок, особенно с учётом ограниченности запасов в других регионах.

Контроль над значительными запасами гелия-3 и развитие технологий его добычи и переработки обеспечивают России стратегическое преимущество в глобальной энергетике и высоких технологиях. Гелий-3 рассматривается как ключевой ресурс будущего, способный обеспечить экологически чистую энергию и технологическое лидерство. В условиях растущей конкуренции за ред

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

кие ресурсы и энергетическую безопасность Россия может использовать гелий-3 как инструмент геополитического влияния и экономического развития.

³He обладает уникальными характеристиками, которые делают его незаменимым в высокотехнологичных отраслях, в то время как ⁴He используется в основном как хладагент и инертный газ.

В таблице 1 рассмотрим ключевые отличия гелия-3 от товарного гелия АмГПЗ:

Таблица 1 – Отличия гелия-3 от гелия-4

Характеристика	Гелий-3 (³ He)	Гелий-4 (⁴ He)
Ядерный состав	2 протона + 1 нейтрон (лёгкий изотоп)	2 протона + 2 нейтрона (основной изотоп)
Атомная масса, а.е.м.	3,016	4,0026
Температура кипения, К	3,19	4,23
Критическая точка, К	3,35	5,19
Объём одного грамма гелия, л	7,43	5,596
Удельная теплота испарения, Дж/моль	26	82,9
Плотность газообразного гелия, г/л	0,1346	0,1785
Температура перехода в сверхтекучую среду при ДНП, К	0,02	2,17

Высокая стоимость оправдывается тем, что гелий-3 имеет уникальные низкотемпературные свойства — незаменим для квантовых технологий, ключевой элемент термояда — единственная «чистая» термоядерная реакция, и остается острая нехватка — добыча сложна, а альтернатив почти нет.

Гелий-3 нельзя заменить гелием-4 из-за его уникальных ядерных и низкотемпературных свойств. Даже микроконцентрации ³He в товарном гелии делают его выделение экономически оправданным.

На рисунке 2 изображено строение двух стабильных изотопов гелия.

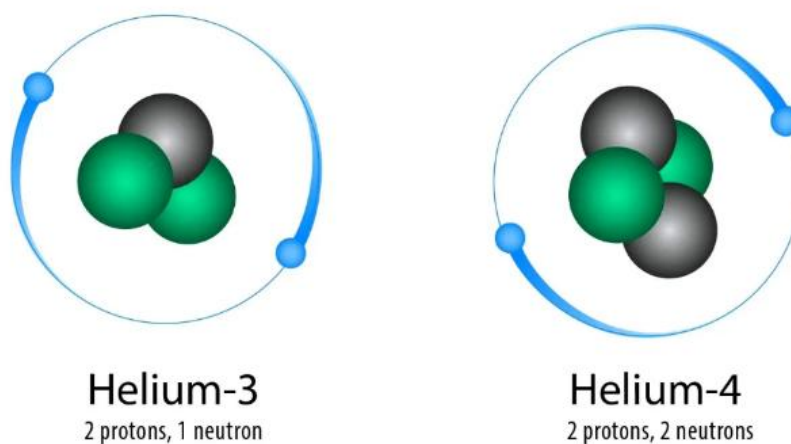


Рисунок 2 – Строение двух стабильных изотопов гелия

Гелий-4 (^4He) – стабильный, нерадиоактивный изотоп гелия, преобладающий в природном гелии. Его ядро содержит два протона и два нейтрона. Синтез двух ядер ^4He не происходит из-за энергетического барьера: энергия связи двух ядер гелия-4 меньше, чем энергия связи нуклонов в ядре бериллия-8. Альфа-распад многих радиоактивных изотопов приводит к образованию ядра ^4He , которое в этом контексте называется альфа-частицей.

При охлаждении ниже температуры – 2,176 К гелий-4 переходит в сверхтекучее состояние, характеризующееся аномальными свойствами. Сверхтекучий гелий-4 представляет собой макроскопическое квантовое состояние, демонстрирующее нулевую вязкость и бесконечную теплопроводность. Изучение сверхтекучести продолжает оставаться актуальной областью исследований в физике конденсированного состояния, поскольку это явление не может быть объяснено классической физикой [11].

При очень низких температурах гелий-4 демонстрирует необычное поведение, становясь сверхтекучим. В этом состоянии он течет без трения, словно игнорируя привычные законы физики. Это происходит из-за образования конденсата Бозе-Эйнштейна, когда атомы гелия объединяются в одно квантовое состояние, что приводит к проявлению квантовой когерентности на макроско-

пическом уровне.

Сверхтекучий гелий-4 обладает рядом уникальных свойств: нулевой вязкостью (отсутствием трения), способностью течь через мельчайшие отверстия без сопротивления, высокой теплопроводностью и образованием квантовых вихрей. Эти вихри вызывают необычные явления, такие как квантованная циркуляция и постоянные токи.

Эти необычные свойства сделали сверхтекучий гелий-4 объектом пристального внимания в науке и технике. Он используется в различных областях, от охлаждения сверхпроводящих устройств до создания прецизионных измерительных приборов. Потенциал его применения огромен и продолжает изучаться.

В последнее время сверхтекучий гелий-4 нашел применение в химической спектроскопии, выступая в роли квантового растворителя. Спектроскопия капель сверхтекучего гелия позволяет изучать молекулы газа. В этой среде молекулы, находясь в сверхтекучем гелии, могут свободно вращаться, как если бы они находились в газовой фазе. Температура капель гелия составляет около 0,4 К, что охлаждает молекулы до их ровибронного состояния, позволяя изучать взаимодействие между вращательными, колебательными и электронными степенями свободы молекул.

Смешивание изотопа гелия-3 с сверхтекучим гелием-4 вызывает понижение температуры смеси. Этот эффект используется в специальных устройствах, называемых рефрижераторами растворения, для достижения очень низких температур. Когда концентрация гелия-3 достигает определенного уровня (около 7 % при температуре 0,87 К), смесь самопроизвольно разделяется на два слоя: один, богатый гелием-3 (содержит около 6,6 % гелия-3), и другой, почти полностью состоящий из гелия-3.

Богатый гелием-3 слой можно использовать для дальнейшего охлаждения. Гелий-3 испаряют, охлаждают и возвращают обратно в камеру растворения. Этот цикл повторяется, что позволяет постепенно снижать температуру.

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Теоретически, процесс можно продолжать до бесконечности, достигая все более низких температур. Однако, размер необходимого оборудования увеличивается с понижением температуры, что делает его громоздким и дорогим при температурах ниже 0,002 К.

Охлаждение с использованием сверхтекучего гелия нашло применение в космосе. Например, в космическом аппарате Gravity Probe В использовались сверхчувствительные гироскопы для измерения гравитационных эффектов. Эти гироскопы, изготовленные из свинца и ниобия, погружались в термос с гелием, охлажденным до температуры ниже 2 К, что позволяло им оставаться в сверхпроводящем состоянии.

Для работы приборов, регистрирующих электромагнитное излучение, таких как болометры, необходимо охлаждение.

Например, инфракрасный астрономический спутник IRAS, запущенный в 1983 году, использовал 73 кг (720 литров) сверхтекучего гелия для поддержания температуры 1,6 К (минус 271,55 °С). Это позволило ему собирать данные в инфракрасном диапазоне.

Спутник COBE, изучавший реликтовое излучение (запущен в 1989 году), также применял систему охлаждения с использованием 650 литров сверхтекучего гелия.

Для достижения еще более низких температур, до 0,1 К, на космическом телескопе Планк был использован рефрижератор растворения.

Аналогичный рефрижератор на телескопе имени Джеймса Клерка Максвелла поддерживает температуру болометров на уровне около 0,075 К, имея базовую температуру около 0,050 К.

Технология сверхтекучего гелия позволяет расширить температурный диапазон криокулеров до низких температур. В настоящее время достигнутый предел составляет 1,19 К, но теоретически возможно достижение 0,7 К.

					ВКР.248737.180301.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Разработка теоретических основ выделения гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты производства Амурского ГПЗ как стратегически важного продукта для экономики	Лит.	Лист	Листов
Разраб.		Толмачева О.Д.				у	25	69
Провер.		Гужель Ю.А.						
Н. контр.		Родина Т.А.						
Утверд.		Гужель Ю.А.				АмГУ ИКиИН 1107-об гр.		

По первому варианту (рисунок 2а) природный газ предварительно охлаждается под давлением 2,0 МПа в рекуперативных теплообменниках до минус 28 °С и аммиаком (при давлении ниже атмосферного) до минус 45 °С, после этого дросселируется до 1,2 МПа и поступает в колонну. В ней происходит основное отделение от газа большей части метана, который содержит примеси азота V, а сверху колонны отводится газ с содержанием гелия около 3 % об. Этот газ подвергается дополнительной конденсации (за счет кипящего при 0,4 МПа азота) во второй колонне, с верха которой отводится гелиевый концентрат III, содержащий до 80 % – 90 % гелия. Верхняя часть первой колонны охлаждается за счет кубовой жидкости, дросселированной до давления 0,15 МПа.

По второму варианту (рисунок 2б) предварительно очищенный и осушенный газ под давлением 3,2 МПа подвергается охлаждению пропаном. После этого, в двух рекуперативных теплообменниках, соединенных с промежуточными сепараторами, газ охлаждается до минус 104 °С и после дросселирования поток с температурой минус 153 °С направляется в колонну. С нижней части колонны отводится метан. Верхняя часть колонны поддерживает температуру минус 191 °С, которая осуществляется за счет рекуперации холода [11].

Азотно-гелиевая смесь дополнительно охлаждается в двух рекуперативных теплообменниках, а затем в двух сепараторах разделяется на концентрат гелия с содержанием 85 % и концентрат азота с чистотой 99,5 %. Расширяющийся в турбодетандере концентрат азота охлаждает верхнюю часть колонны и выводится в качестве продукта таким способом извлекается около 95 % – 96 % гелия от его исходного содержания в газе.

Принципиальная технологическая схема процесса одновременного извлечения гелия, этана и широкой фракции углеводородов из бедного гелийсодержащего газа представлена на рисунке 4.

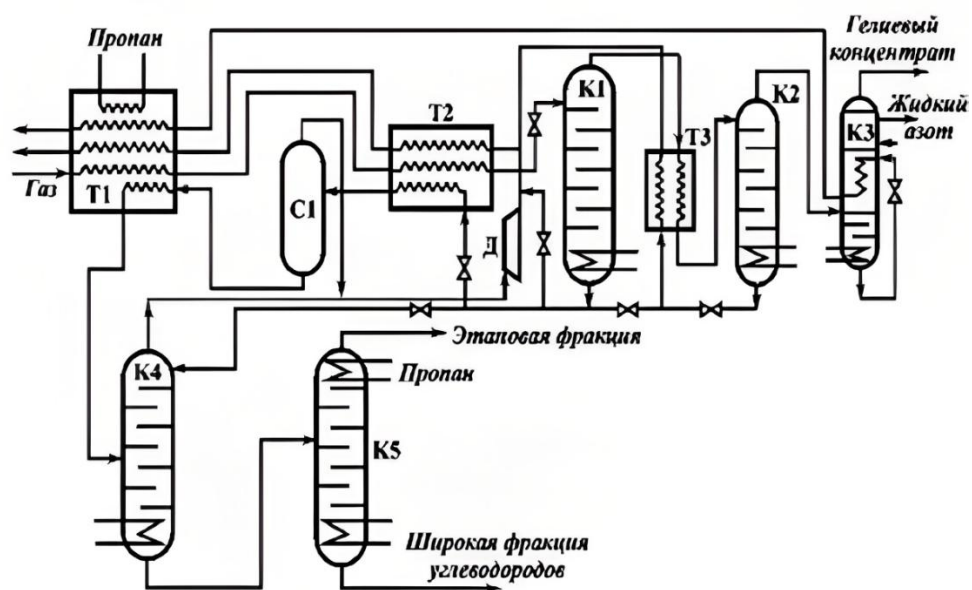


Рисунок 4 – Принципиальная технологическая схема установки выделения гелиевого концентрата, этана и ШФЛУ из природного газа

Схема включает две ступени прямоточной конденсации с отпаркой растворенного гелия в отпарных колоннах, заполненных насадкой из колец Палля и двух ступеней противоточной конденсации. Этан и широкая фракция углеводородов извлекаются из обратного потока газа после извлечения из него гелия. Установка может работать как в режиме получения только гелия, так и в режиме одновременного получения гелия, этана и ШФЛУ.

Основное количество холода, обеспечивающее извлечение гелия, получают при дросселировании большей части обратного потока газа до 3,8 – 3,6 МПа, 20 % – до 1,8 – 1,6 МПа, 1,5 % обратного потока дросселируется до давления 0,3 МПа [11].

При одновременном извлечении гелия, этана и ШФЛУ дополнительный холод получают детандированием обратного потока газа с 3,8 – 3,6 МПа до 1,8 – 1,6 МПа. В этом случае весь обратный поток выходит с установки под давлением 1,5 МПа, дожимается в компрессорах до исходного давления и поступает в газопровод для транспортирования.

Технологическая схема включает пропановые холодильные установки.

Пропаном, кипящим при изотерме минус 36 °С, производят предварительное охлаждение газа. Пропаном, кипящим при минус 5 °С, конденсируют флегму в дефлегматоре деэтанизатора. Азотный холодильный цикл обеспечивает холодом вторую ступень противоточной конденсации, а также установку очистки гелиевого концентрата от примесей.

В витых многопоточных теплообменниках Т1 и Т2 природный газ при давлении 4,5 МПа охлаждается, конденсируется и переохлаждается. После дросселирования до 4 МПа при температуре минус 93 °С в состоянии насыщенной жидкости поток подается на верх отпарной колонны К1. В куб колонны К1 подводится теплота для отпарки растворенного гелия. В качестве теплоносителя используется поток охлаждаемого природного газа. Количество газа, отпаренного в колонне К1, составляет 10 % от поступающего потока. Содержание гелия в жидкости, выходящей из куба колонны, составляет <0,001 %. Температура верха и низа колонны минус 93 °С и минус 91 °С соответственно. В колонне К1 происходит десятикратное обогащение гелием выходящего сверху колонны газа.

Основное количество этана, содержащегося в газе, концентрируется в кубовой жидкости колонны К1, которая поступает на разделение в узел деэтанизации. Часть кубовой жидкости дросселируется до 3,8 МПа, проходит теплообменник Т2 и поступает в сепаратор С1. Конденсат, выделенный в сепараторе С1, подогревается в теплообменнике Т1 и подается в деметанизатор К3 при температуре минус 40 °С в качестве питания. Другая часть кубовой жидкости колонны К1 дросселируется до 3,8 МПа и подается в деметанизатор К3 в качестве орошения при температуре минус 93 °С [11].

Пар из колонны К1 охлаждается и конденсируется в прямоточном теплообменнике Т3, а затем подается при давлении 3,9 МПа и температуре минус 108 °С в отпарную колонну К2. В качестве теплоносителя в кубе колонны К2 используется природный газ. Отпарка в колонне К2 составляет около 10 % от поступающего потока. Содержание гелия в кубовой жидкости колонны К2 сос-

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

тавляет <0,001 %. Концентрация гелия, выходящего из верхней части колонны К2, в 100 раз выше его концентрации в исходном газе. Температура верха колонны К2 минус 107 °С; температура куба минус 103 °С. Кубовая жидкость колонны К2, содержащая около 15 % азота, 85 % метана и незначительное количество более тяжелых углеводородов, дросселируется до 18 МПа и поступает в качестве хладагента в прямоточный конденсатор ТЗ. Пар, выходящий из колонны К2 и содержащий 5,5 % гелия, дросселируется до давления 1,8 МПа и поступает для дальнейшего обогащения в колонну КЗ. Колонна КЗ состоит из противоточного конденсатора, насадочной и кубовой части. Противоточный конденсатор имеет две ступени. В первой ступени хладагентом является кубовая жидкость колонны КЗ, содержащая около 30 % азота и 70 % метана, сдросселированная до 0,3 МПа. Во второй ступени противоточного конденсатора хладагентом является жидкий азот, кипящий при температуре минус 194 °С. Из верхней части колонны КЗ выходит гелиевый концентрат, содержащий 85 % – 90 % гелия, который направляется затем на очистку от примесей [16].

В колонну К4 на деметанизацию поступает поток, составляющий около 30 % от исходного количества газа. Давление в колонне – 3,6 МПа. Соотношение потоков, подаваемых в качестве орошения и питания – 1:1. Извлечение этана с нижним продуктом составляет около 85 %. Теплоносителями в кипяtilьнике колонны К4 являются водяной пар и широкая фракция углеводородов, отводимая из куба деэтанизатора К5.

Метановая фракция, выходящая из верхней части деметанизатора К4, объединяется с паром, выходящим из сепаратора С1, и поступает в детандер Д, где расширяется до 1,8 МПа. С температурой минус 103 °С поток поступает в качестве хладагента в конденсатор Т2, а затем в теплообменник Т1.

Деметанизованная в колонне К4 смесь углеводородов поступает затем в деэтанизатор К5, работающий при давлении 3 МПа. Деэтанизатор оснащен дефлегматором и кипяtilьником. Теплоноситель в кипяtilьнике – водяной пар. Сверху колонны отбирается этановая фракция с содержанием 95 % этана,

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

а снизу — широкая фракция углеводородов, содержащая около 60 % пропана.

Криогенные методы, несмотря на высокие эксплуатационные затраты, весьма эффективны, так как позволяют на различных стадиях выделения гелия из природного газа попутно получать ценные товарные продукты — этан, метановую фракцию и ШФЛУ.

4.2. Мембранный метод выделения гелия

Принципом работы мембранных газоразделительных систем является разница в скорости проникновения компонентов газа через вещество мембраны, а движущей силой процесса разделения газа — разница парциальных давлений на различных сторонах мембраны. Данный способ основан на высокой проникающей способности гелия в сравнении с другими газами, способности его селективно проникать (фильтроваться) через очень мелкие поры различных материалов, выполненных в виде пленок — мембран.

На рисунке 5 приведена принципиальная схема мембранной трехступенчатой установки получения гелиевого концентрата из газа.

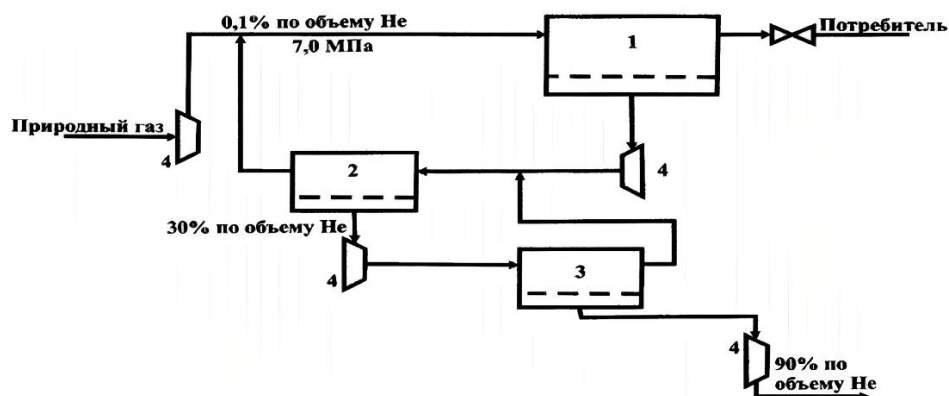


Рисунок 5 — Схема мембранной установки выделения гелия

1, 2, 3 — мембранные аппараты соответственно 1, 2, 3 ступеней;

4 — компрессор

Природный газ с низким содержанием гелия (0,06 % об.), предварительно очищенный от кислых компонентов, компримируется до давления 7 МПа, объединяется с ретантом — потоком, не прошедшим через мембрану, отводимым

из мембранного аппарата второй ступени разделения, и поступает в мембранный модуль первой ступени. Ретант с первой ступени, практически не содержащий гелия, направляется к потребителю как товарный газ, а пермеат (проникающий поток, обогащенный гелием) после компримирования до первоначального давления поступает на вторую ступень мембранного разделения. Пермеат второй ступени разделения содержит 30 % об., а пермеат третьей ступени – 90 % об. гелия.

Полученный гелиевый концентрат, содержащий остаточные количества метана, азот, водород, а также небольшие количества инертных газов (неон и т.п.), направляют на выделение чистого гелия по мембранной или криогенной технологии.

В промышленности для очистки гелия от азота, неона и микропримесей используются низкотемпературные конденсация и адсорбция – процессы, требующие как значительных энергетических затрат, так и хладагента – жидкого азота, поскольку протекают при температурах минус 175 °С – минус 200 °С.

Методы выделения гелия с помощью мембранной технологии менее энергоемки, особенно при небольшом содержании гелия. При низких содержаниях гелия в природном газе (0,05 % – 0,08 % об.) криогенный метод оказывается неэффективным, так как в этом случае требуется организация многоступенчатого процесса, что значительно повышает капитальные и эксплуатационные затраты. Использование мембран для получения гелиевого концентрата с его последующей ректификацией можно существенно улучшить экономику процесса (рисунок 4). По сравнению с криогенным способом мембраны позволяют получить не только гелиевый концентрат, но и выделить из него чистый гелий [11–12].

Для применения на практике мембраны должны обладать высокой абсолютной проницаемостью для гелия и высокой селективностью, быть химически и физически стабильными, иметь высокую прочность и быть лишенными дефектов в виде микропор. Именно в этих направлениях проводятся широкие

исследования для разработки и совершенствования мембранной технологии. В России мембранные установки для получения чистого гелия из гелиевого концентрата, в основном, находятся на стадии пилотных или промышленных испытаний и на отечественных заводах пока не эксплуатируются.

Весьма эффективным представляется комбинация мембранного и криогенного методов разделения: получение гелиевого концентрата (75 % – 95 % об. гелия) по мембранной технологии с последующим криогенным выделением чистого гелия (сочетанием низкотемпературных конденсации и адсорбции). Такая комбинация методов позволяет на 20 % снизить себестоимость товарного продукта по сравнению с традиционным криогенным способом выделения гелия.

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

5 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ГЕЛИЯ-3

5.1 Анализ источников гелия-3

Основная часть гелия-3 на Земле сохранилась со времён её формирования и растворена в мантии, постепенно поступая в атмосферу через вулканы и разломы, однако объёмы такого поступления оцениваются всего в несколько килограммов в год. Кроме того, гелий-3 образуется при распаде космогенного трития и поступает из солнечного ветра, однако магнитное поле Земли значительно ограничивает его проникновение в атмосферу.

Рассмотрим источники добычи гелия-3. На сегодня существует несколько принципиально разных способов получения ^3He :

- выделение из товарного гелия (криогенная ректификация)
- накопление при распаде трития (естественное и искусственное)
- добыча из лунного реголита (перспективное направление)

Каждый из этих подходов имеет уникальные преимущества и серьёзные ограничения. В данном анализе мы:

- сравним технологическую сложность разных методов
- оценим экономическую целесообразность каждого подхода
- определим оптимальные направления развития добычи ^3He

В таблице 5 показан сравнительный анализ методов получения гелия-3.

Как видно из таблицы криогенный метод является единственным технологически готовым и экономически выгодным вариантом получения гелия-3. Криогенные установки легко интегрируются в действующие комплексы по сжижению и переработке природного газа, что позволяет использовать уже существующую инфраструктуру и снижать капитальные и эксплуатационные затраты.

					ВКР.248737.180301.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Толмачева О.Д.				Разработка теоретических основ выделения гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты производства Амурского ГПЗ как стратегически важного продукта для экономики	Лит.	Лист	Листов
Провер.	Гужель Ю.А.					у	33	69
Н. контр.	Родина Т.А.							
Утверд.	Гужель Ю.А.					АмГУ ИКиИН 1107-об гр.		

Таблица 2 – Сравнительный анализ источников выделения гелия-3

Метод	Серье	Содержание	Себестоимость	Технология получения	Плюсы	Минусы
Товарный гелий (АмГПЗ)	Природный газ	0,1 – 1 ppm (частей на миллион).	\$500 – 1500/л.	Многоступенчатая криогенная ректификация при температурах 4 К – 20 К. Дополнительная очистка мембранами или центрифугированием.	Используется существующая инфраструктура добычи гелия (например, АмГПЗ). Относительно низкие капитальные затраты (\$30 – 70 млн для установки). Подходит для промышленного масштабирования.	Крайне низкое содержание ^3He – для 1 литра нужно переработать ~ 1 млн m^3 товарного гелия. Высокие энергозатраты (800 – 1200 кВт·ч/л).
Лунный реголит	Лунный грунт	0,01 % (100 ppm)	\$1 – 10 млн/л	Нагрев реголита до 700 – 800 °С для выделения гелия. Криогенное разделение изотопов на Луне или доставка сырья на Землю.	В 100 – 1000 раз больше ^3He , чем в земных источниках. Нет зависимости от земных запасов.	Требуется создания лунной инфраструктуры (добыча, переработка, транспортировка). Оценочная стоимость доставки: \$1 – 10 млн/кг (не считая добычи). Реализация не раньше 2040 – 2050 гг.
Тритиевый распад	Тритий (^3H)	Накопление ~12 лет	\$3000 – 6000/л.	Естественный распад: $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \beta^-$ (период полураспада 12,3 года). Искусственное ускорение (дорого и сложно)	Чистый ^3He без примесей. Подходит для лабораторных нужд (медицина, детекторы).	Очень медленно – для 1 кг ^3He нужно >12 лет и десятки кг трития. Тритий дорогой (\$30000 – 50000/г) и радиоактивен.

Также криогенная технология широко применяется на промышленных предприятиях в России доказав свою эффективность и надёжность. Гибкость и масштабируемость не маловажный аспект. Современные криогенные установки могут быть адаптированы под различные объёмы производства и позволяют форсировать пусковые режимы без потери эффективности.

5.2 Термоядерный синтез как источник гелия-3

Гелий-3 образуется в результате термоядерных реакций, в частности в результате последовательных превращений изотопов водорода. Процесс начинается со слияния двух протонов — атомов водорода — в нестабильное состояние, известное как дипротон или изотоп гелия-2. Этот изотоп крайне нестабилен и распадается примерно за миллиардную долю секунды. Однако иногда один из протонов может спонтанно превратиться в нейтрон, в результате чего дипротон превращается в стабильный изотоп тяжёлого водорода — дейтерий, состоящий из одного протона и одного нейтрона.

Далее дейтерий может поглотить ещё один протон, что приводит к образованию стабильного изотопа гелия-3, содержащего два протона и один нейтрон.

Реализация полного цикла термоядерного синтеза с образованием гелия-3 на Земле практически невозможна из-за ряда факторов. Превращение дипротона в дейтерий является вероятностным процессом, требующим огромных масс вещества и экстремальных условий, которые трудно воспроизвести в промышленных масштабах.

Гелий-3 в настоящее время не производится в промышленных масштабах. Его можно получить искусственно или добыть в природных условиях, например, на поверхности Луны.

В природе гелий-3 образуется в результате радиоактивного распада тяжёлых элементов, таких как уран и торий. Однако концентрация изотопа в природных источниках чрезвычайно мала, что делает его добычу экономически невыгодной.

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

Практически весь гелий-3, используемый в промышленности, получают в результате радиоактивного распада трития — радиоактивного изотопа водорода. В ходе этого процесса происходит бета-распад трития, в результате которого образуется атом гелия-3 с одновременным испусканием электрона и антинейтрино.

Энергия, выделяющаяся при распаде трития, составляет около 18,59 кэВ, из которых примерно 5,7 кэВ приходится на электрон (бета-частицу), а оставшаяся часть — на электронное антинейтрино [13].

Механизм представлен на рисунке 6.

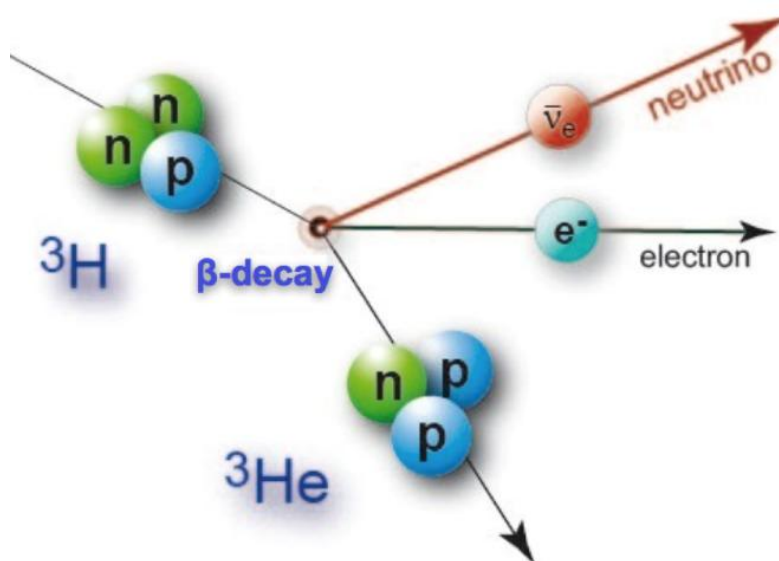


Рисунок 6 – Бета-распад трития

Распад трития сопровождается изменением атомного номера дочернего атома, что влияет на его химические свойства и способность образовывать связи. Поскольку дочерним элементом является инертный газ — гелий, происходит разрыв химических связей в молекулах, где произошёл распад. Это может приводить к многократной ионизации, а также к электронному и колебательному возбуждению молекул.

Таким образом, термоядерное получение гелия-3 — сложный и энергозатратный процесс, который на сегодняшний день ограничен экспериментальными и научными разработками, а промышленное производство гелия-3 в ос-

новном связано с радиоактивным распадом трития. Для полного понимания роли гелия-3 в современной науке и промышленности важно рассмотреть не только процессы его термоядерного образования, но и практические методы выделения этого изотопа из природных и товарных источников. Поскольку промышленное получение гелия-3 в больших объёмах посредством термоядерных реакций пока остаётся технически сложным и экономически невыгодным, особое значение приобретает эффективное извлечение гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты.

5.3 Анализ методов выделения гелия-3 из товарного гелия

Выделение гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты — это сложный и многоступенчатый процесс, требующий применения различных инновационных методов и технологий. Гелий-3, как редкий и ценный изотоп, обладает уникальными физико-химическими свойствами, что делает его востребованным в научных исследованиях, энергетике, медицине и высокотехнологичной промышленности. Ввиду крайне низкой концентрации гелия-3 в природном гелии и высокой стоимости изотопа, задача эффективного его выделения приобретает стратегическое значение.

Рассмотрим основные методы выделения гелия-3:

1. Фракционная дистилляция

Этот процесс основан на различиях в температурах кипения изотопов гелия. Гелий-4, наиболее распространенный изотоп, имеет более высокую температуру кипения по сравнению с гелием-3. При охлаждении товарного гелия до низких температур, гелий-4 будет конденсироваться, в то время как гелий-3 останется в газообразном состоянии. Однако фракционная дистилляция требует значительных энергетических затрат и может быть ограничена по масштабируемости, что делает её менее подходящей для крупных производств. Этот метод требует точного контроля температуры и давления, а также специализированного оборудования для достижения необходимой степени разделения [14].

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

2. Адсорбция

Другим методом, который заслуживает внимания, является адсорбция. Этот процесс основан на способности различных веществ прилипать к поверхности адсорбента. В случае выделения гелия-3 адсорбция может быть использована для разделения изотопов на основе их взаимодействия с адсорбентом. Однако адсорбция может быть ограничена по своей способности к масштабированию, что делает её менее подходящей для крупных производств. Кроме того, эффективность адсорбции может зависеть от условий, таких как температура и давление, что требует тщательной настройки процесса. Важно учитывать, что адсорбция может быть ограничена по своей способности к масштабированию, что делает его менее подходящим для крупных производств.

3. Мембранная сепарация

Методы мембранной сепарации также представляют интерес для выделения гелия-3. Использование полупроницаемых мембран позволяет разделять изотопы на основе их молекулярного размера и диффузионных свойств. Гелий-3, имея меньший размер, может проходить через мембрану быстрее, чем гелий-4. Этот метод может быть более эффективным в условиях, когда требуется непрерывное выделение гелия-3. Однако его эффективность зависит от свойств используемой мембраны и условий работы, таких как температура и давление. Кроме того, стоимость мембран может быть значительной, что также следует учитывать при выборе метода.

4. Магнитные методы

Магнитные методы выделения гелия-3 основываются на использовании магнитных полей для разделения изотопов на основе их ядерных свойств, таких как спин. Этот метод, хотя и более сложный, может обеспечить высокую степень чистоты получаемого гелия-3. Однако он требует специализированного оборудования и может быть менее экономически целесообразным для массового производства.

5. Криогенная ректификация

Последним и наиболее распространённым методом выделения гелия-3 является криогенная ректификация. Этот процесс основан на разнице в температурах кипения изотопов гелия: гелий-3 кипит при более низкой температуре, чем гелий-4, что позволяет эффективно разделять их при сверхнизких температурах. Ректификация обеспечивает высокую степень очистки и концентрации гелия-3, что делает её предпочтительным методом для промышленного производства.

Однако ректификация требует значительных энергетических затрат на поддержание экстремально низких температур и высокого давления, что увеличивает сложность и стоимость оборудования. Кроме того, эффективность процесса может снижаться при наличии примесей в товарном гелии, что требует предварительной очистки и дополнительной настройки технологических параметров. Масштабируемость ректификационных установок также ограничена из-за сложности поддержания стабильных криогенных условий при больших объёмах.

Тем не менее, благодаря высокой эффективности и возможности получения гелия-3 с чистотой 99,9 %, криогенная ректификация остаётся ключевым методом выделения гелия-3 в промышленных масштабах [15].

Современная практика показывает, что криогенная ректификация наиболее эффективным и востребованным методом для промышленного получения гелия-3, несмотря на высокие требования к оборудованию и энергопотреблению. Для лабораторных нужд и малых объёмов могут применяться фракционная дистилляция и мембранная сепарация, а адсорбция и магнитные методы используются в специфических задачах, где требуется высокая селективность или чистота.

Выделение гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты требует комплексного подхода, сочетающего традиционные методы, такие как фракционная дистилляция, с современными технологиями — мембранной сепарацией и

магнитными методами. Каждый из этих способов обладает своими преимуществами и ограничениями, а выбор конкретного метода зависит от условий производства, а также требований к чистоте и объёму получаемого гелия-3.

Сравнительный анализ существующих методов выделения гелия-3 представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительный анализ методов

Критерий	Фракционная дистиляция	Адсорбция	Мембранная сепарация	Магнитные методы	Криогенная ректификация
Энергоёмкость	Высокая	Средняя	Низкая	Очень высокая	Очень высокая
Чистота продукта	90 % – 95 %	80 % – 85 %	70 % – 80 %	99,999 %	99,9 %
Масштабируемость	Средняя	Низкая	Средняя	Низкая	Средняя
Зависимость от примесей	Высокая	Средняя	Высокая	Низкая	Высокая
Стоимость внедрения	Средняя	Низкая	Высокая	Очень высокая	Высокая
Перспективность развития	Средняя	Средняя	Высокая	Низкая	Очень высокая

Особое значение имеет тот факт, что продолжающиеся исследования в области выделения гелия-3 способствуют разработке новых, более эффективных технологий. Это открывает дополнительные возможности для расширения применения гелия-3 в различных научных и промышленных сферах.

Сравнительный анализ существующих методов подчёркивает необходимость комплексного подхода, который учитывает сильные стороны как традиционных, так и инновационных технологий. Такой подход позволяет достигать оптимальных результатов при получении этого ценного изотопа, обеспечивая баланс между эффективностью, экономичностью и качеством продукта.

5.3 Факторы, влияющие на процесс выделения гелия-3

При выделении гелия-3 из товарного гелия на процесс значительно влияют такие факторы, как температура и давление. Эти параметры определяют как скорость отделения, так и его эффективность, а также чистоту конечного продукта.

Температура является важным фактором, который влияет на термодинамические свойства систем, где происходит выделение гелия-3. С повышением температуры компоненты смеси могут переходить из жидкого состояния в газообразное, что может снизить селективность разделения. Например, в процессе фракционной дистилляции более низкие температуры способствуют более эффективному разделению, так как при низких энергиях молекулы различных изотопов реже взаимодействуют. Однако, если температура слишком низкая, это может привести к трудностям с конденсацией и образованию осадков, что негативно отразится на выходе целевого изотопа.

В адсорбционных процессах температура также имеет значительное значение. При повышении температуры адсорбенты могут утрачивать способность удерживать молекулы гелия-3, что приводит к снижению выхода. Однако в некоторых ситуациях небольшое повышение температуры может ускорить контакт молекул с адсорбентом, увеличивая выход. Поэтому важно для каждого метода выделения находить оптимальные температурные режимы для эффективного использования технологий.

Давление оказывает значительное влияние на динамику процессов. При увеличении давления плотность молекул возрастает, что способствует частым столкновениям и ускоряет выделение. Например, в мембранных установках при высоком давлении увеличивается пропускная способность мембран, что положительно влияет на скорость отделения гелия-3. Тем не менее, стоит учитывать, что повышение давления связано с увеличением энергетических затрат на работу систем, что может значительно увеличить стоимость процесса. Поэтому необходима оптимизация условий, чтобы достичь хорошего баланса

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

между высоким выходом и экономичностью.

Важно также отметить, что температура и давление взаимодействуют друг с другом, создавая сложные условия для выделения. Изменение одного из этих параметров может существенно повлиять на характеристики другого. Например, рост температуры может не только снизить селективность, но и потребовать коррекции условий работы системы, что также связано с изменением давления [16].

6 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

6.1 Характеристика сырья установки

Товарный гелий представляет собой газовую смесь, основным компонентом которой является гелий, а также присутствуют различные примеси, включая углеводороды (в том числе алканы), азот, неон и другие вещества. Газовый состав данной смеси непостоянен и может меняться в процессе эксплуатации скважины. Примерный состав газа, поступающего на Амурский газоперерабатывающий завод, приведён в таблице 4.

Таблица 4 – Состав газа

Компонент	Мольное содержание %
Гелий-4	99,99
Примеси, в том числе:	
Гелий-3	0,007
Азот и аргон	0,0002
Кислород	0,0004
Углеводороды	0,0002
Неон	0,0004
Водород	0,001
Углекислый и угарный газ	0,0003
Водяной пар	0,0005
Итого	100

В течение года Амурский газоперерабатывающий завод производит – 3246 тонн товарного гелия. Основным продуктом установки является товарный гелий (гелий-4), содержащий в том числе доли тысячных процента гелия-3.

Газообразный гелий, производимый на Амурском ГПЗ, соответствует стандарту ТУ 0271-005-45905715-2011 «Технические условия на гелий газооб-

					ВКР.248737.180301.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Толмачева О.Д.				Разработка теоретических основ выделения гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты производства Амурского ГПЗ как стратегически важного продукта для экономики	Лит.	Лист	Листов
Провер.	Гужель Ю.А.					у	43	69
						АМГУ ИКиИН 1107-об гр.		
Н. контр.	Родина Т.А.							
Утверд.	Гужель Ю.А.							

разный (сжатый), марка Б». Чистота гелия составляет не менее 99,990 % по объёмной доле. Содержание примесей строго регламентировано: водорода (H₂) – не более 0,0001 %, азота (N₂) – не более 0,0005 %, кислорода (O₂) и аргона (Ar) – в сумме не более 0,0006 %, углеводородов – не более 0,0001 %, неона (Ne) – не более 0,004 % [17].

6.2 Описание технологической схемы

По работе предлагается метод криогенной ректификации извлечения гелия-3 из товарного гелия. Полученный продукт отличается высокой степенью очистки и концентрацией изотопа ³He, что позволяет использовать его в научных и технологических целях. Коэффициент извлечения гелия-3 достигает не менее 99,9 %. Гелий-3 выпускается в сжатом газообразном виде в стальных баллонах по ГОСТ 949-73 «Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на $P_r \leq 19,6$ МПа (200 кгс/см кв.). Технические условия.» под давлением до 14,7 МПа (150 атм) [18].

Если гелий поступает в систему в газообразном состоянии, то для его сжижения используется установка, которая называется внешний ожижитель, представляет собой сложный комплекс оборудования, предназначенный для сжатия, охлаждения, расширения и конденсации гелия. Процесс сжижения осуществляется в несколько этапов с использованием каскада детандеров.

Внешний ожижитель состоит из пяти теплообменников Т-1–Т-5, двух детандеров Дт-1 и Дт-2, дроссельного вентиля Др-1 и сепаратора жидкости и газа С-1. Газообразный гелий с температурой 80 К и давлением 1,3 МПа поступает в первый теплообменник. После охлаждения в нем, поток разделяется на две части: сжижаемый и детандерный.

Детандерный поток расширяется в первом детандере, затем поступает в третий теплообменник и, наконец, расширяется во втором детандере до давления 0,12 МПа. После второго детандера поток смешивается с обратным потоком, идущим из сепаратора.

На рисунке 7 представлена технологическая схема выделения гелия-3 из

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

товарного гелия Амурского ГПЗ.

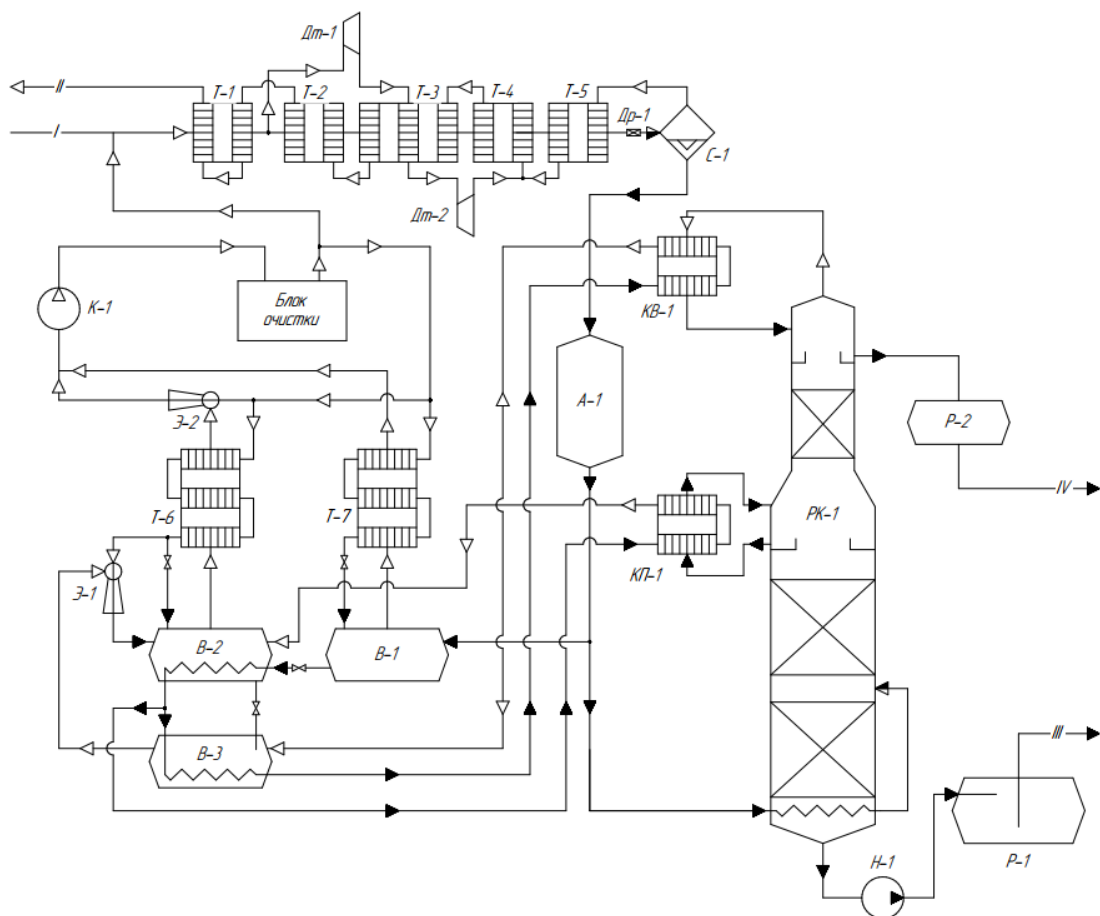


Рисунок 7 – Технологическая схема выделения гелия-3 из товарного гелия Амурского ГПЗ

I – товарный гелий с АмГПЗ; II – отходящий газ; III – очищенный жидкий гелий-4; IV – товарный гелий-3.

T-1/7 – теплообменник; Др-1 – дроссельный вентиль; С-1 – сепаратор; ДТ-1/2 – детандер; А-1 – емкость-аккумулятор; РК-1 – ректификационная колонна; КП-1 – промежуточный конденсатор; КВ-1 – верхний конденсатор; Н-1 – насос; Р-1/2 – криогенный резервуар-накопитель; В-1/3 – ванна с жидким гелием; Э-1/2 – эжектор; К-1 – компрессор

Сжижаемый поток последовательно охлаждается во всех пяти теплообменниках Т-1–Т-5, затем проходит через дроссельный вентиль и поступает в сепаратор при температуре 5 К. В сепараторе происходит разделение парожид-

костной смеси на жидкую и газообразную фазы. Газовый поток из сепаратора нагревается в теплообменнике 5, смешивается с потоком, выходящим из второго детандера, и затем последовательно нагревается в теплообменниках Т-4, Т-3, Т-2 и Т-1.

Товарный гелий в жидком виде поступает в установку и накапливается в специальном резервуаре А-1. Оттуда он направляется в ректификационную колонну РК-1 для разделения изотопов гелия, а также используется для создания избыточного обратного потока в системе рефрижератора с избыточным обратным потоком (РИОП).

Ректификационная колонна РК-1 разделяет гелий на два продукта: очищенный жидкий гелий-4 (основной продукт) и товарный гелий-3 (верхний продукт). Она состоит из двух частей: нижней и верхней колонн. Нижняя колонна включает в себя куб с испарителем, две секции с насадкой и промежуточный конденсатор КП-1. Верхняя колонна содержит секцию с насадкой и верхний конденсатор КВ-1. В нижней колонне происходит первичное обогащение гелием-3, а в верхней - его дальнейшая концентрация.

Флегма (жидкость, стекающая вниз по колонне) обеспечивается конденсаторами: промежуточным КП-1 в нижней колонне и верхним КВ-1 в верхней. Из куба нижней колонны отводится жидкий переохлажденный гелий-4, очищенный от гелия-3, который насосом Н-1 перекачивается в криогенный резервуар Р-1 для хранения товарного гелия-4. Из верхней же части колонны отводится товарный гелий-3.

Жидкость, конденсирующаяся в верхнем конденсаторе КВ-1, представляет собой чистый гелий-3. Она используется для создания флегмы в верхней колонне и частично отводится в контейнер для гелия-3 в качестве конечного продукта.

Для эффективной работы конденсаторов, каждый из которых функционирует при определенной температуре, необходимо отводить тепло конденсации, генерируя холод на разных температурных уровнях. Этот холод может

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

быть получен с помощью одной или нескольких ванн с жидким гелием в ступени окончательного охлаждения рефрижератора с избыточным обратным потоком. Использование отдельных ванн для каждого конденсатора более экономично, чем использование одной ванны, так как в последнем случае весь холод должен быть произведен на самом низком температурном уровне.

Система окончательного охлаждения (СОО) служит для понижения температуры гелия до значений, необходимых для работы конденсаторов КП-1 и КВ-1. Чтобы эффективно отводить тепло, выделяющееся при конденсации в КП-1 и КВ-1, которые функционируют при разных температурах, в СОО размещены ванны В-1 – В-3)- с жидким гелием, поддерживающие разные температурные уровни (например, В-1 – 4,5 К, В-2 – 3,0 К и В-3 – 2,4 К). Для откачки гелия из этих ванн до достижения равновесного давления используются струйные насосы (эжекторы Э-1 и Э-2) [15].

Компрессор К-1 сжимает газообразный гелий, поступающий из обратного потока РИОП, до давления прямого потока РИОП. Он обеспечивает циркуляцию гелия в РИОП и направляет часть газообразного гелия обратно во внешний ожижитель гелия.

Блок очистки удаляет из циркулирующего гелия примеси, такие как пары воды и масло. Теплообменники Т-6 и Т-7 охлаждают гелий, циркулирующий в РИОП, от температуры окружающей среды до температуры в диапазоне 4 – 10 К.

Холодопроизводительность рефрижераторов с избыточным обратным потоком регулируется изменением количества гелия, выходящего из компрессора. Гелий, взятый из внешнего ожижителя в жидком виде для работы рефрижератора, возвращается обратно во внешний ожижитель в газообразном состоянии с тем же расходом, пройдя через компрессор и блок очистки.

6.3 Расчет материального баланса колонны

Содержание легколетучего компонента:

$\bar{X}_F = 0,007 \%$ – в исходной смеси;

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

$\bar{X}_D = 99,9 \%$ – в дистилляте;

$\bar{X}_W = 0,0001 \%$ – в кубовом остатке;

$F = 3246 \frac{\text{т}}{\text{год}} = 0,102930 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ – производительность по исходной смеси.

Производительность колонны по дистилляту D кубовому остатку W определим из уравнений материального баланса колонны:

$$F = D + W; \quad (1)$$

$$F\bar{X}_F = D\bar{X}_D + W\bar{X}_W; \quad (2)$$

Отсюда находим:

$$W = \frac{F(\bar{X}_D - \bar{X}_F)}{\bar{X}_D - \bar{X}_W} \quad (3)$$

$$W = \frac{0,102930(0,999 - 0,00007)}{0,999 - 0,000001} = 0,102923 \text{ кг/с}$$

$$D = F - W \quad (4)$$

$$D = 0,102930 - 0,102923 = 0,000007 \text{ кг/с}$$

Нагрузки ректификационной колонны по пару и жидкости определяются рабочим флегмовым числом R; его оптимальное значение $R_{\text{опт}}$ можно найти путём технико-экономического расчета. Используют приближенные вычисления, основанные на определении коэффициента избытка флегмы (орошения) $b = R/R_{\text{min}}$. Здесь R_{min} – минимальное флегмовое число:

$$R_{\text{min}} = \frac{x_D - y'_F}{y'_F - x_F} \quad (5)$$

где x_F и x_D – мольные доли легколетучего компонента соответственно в исходной смеси и дистилляте, кмоль/кмоль смеси;

y'_F – концентрация легколетучего компонента в паре, находящемся в равновесии с исходной смесью, кмоль/кмоль смеси.

Один из возможных приближенных методов расчета R заключается в нахождении такого флегмового числа, которому соответствует минимальное произведение $N(R+1)$, пропорциональное объему ректификационной колонны, где:

N – число ступеней изменения концентраций или теоретических тарелок, определяющее высоту колонны;

$R+1$ – расход паров и, следовательно, сечение колонны).

Определяем R . Пересчитаем составы фаз из массовых долей в мольные по соотношению:

$$X_F = \frac{\bar{X}_F / M_a}{\bar{X}_F / M_a + (1 - \bar{X}_F) / M_c} \quad (6)$$

$$X_F = \frac{0,00007 / 3,016}{0,00007 / 3,016 + (1 - 0,00007) / 4,003} =$$

$$= 9,291 \cdot 10^{-5} \text{ кмоль/кмоль} \cdot \text{см}$$

где M_a и M_c – молекулярные массы соответственно гелий-3 и гелий-4, кг/кмоль.

Аналогично найдем:

$$X_D = \frac{\bar{X}_D / M_a}{\bar{X}_D / M_a + (1 - \bar{X}_p) / M_c} \quad (7)$$

$$X_D = \frac{0,999 / 3,016}{0,999 / 3,016 + (1 - 0,999) / 4,003} = 0,999 \text{ кмоль/кмоль} \cdot \text{см}$$

$$X_w = \frac{\bar{X}_w / M_a}{\bar{X}_w / M_a + (1 - \bar{X}_w) / M_c} \quad (8)$$

$$X_w = \frac{0,000001 / 3,016}{0,000001 / 3,016 + (1 - 0,000001) / 4,003} =$$

$$= 13,273 \cdot 10^{-5} \text{ кмоль/кмоль} \cdot \text{см}$$

Примем $y'_F = 0,000175$

Тогда минимальное флегмовое число равно:

$$R_{\min} = \frac{X_D - y'_F}{y'_F - X_F} \quad (9)$$

$$R_{\min} = \frac{0,999 - 0,000175}{0,000175 - 0,7 \cdot 10^{-5}} = 9512$$

Задавшись различными значениями коэффициентов избытка флегмы b , определим соответствующие флегмовые числа. Результаты расчетов рабочего флегмового числа представлены в таблице 5:

Таблица 5 – Значения рабочего флегмового числа

b	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
R	10463	11414	12365	13316	14268

Условно-оптимальное значение $R = 11414$

Средние массовые расходы (нагрузки) по жидкости для верхней и нижней частей колонны определяют из соотношений;

$$L_v = \frac{D \cdot R \cdot M_{\text{верх}}}{M_p} \quad (10)$$

$$L_n = \frac{D \cdot R \cdot M_{\text{ниж}}}{M_p} + \frac{F' M_{\text{ниж}}}{M_F} \quad (11)$$

где M_p и M_F – мольные массы дистиллята и исходной смеси;

$M_{\text{верх}}$ и $M_{\text{ниж}}$ – средние мольные массы жидкости в верхней и нижней частях колонны.

Мольную массу дистиллята в данном случае можно принять равной мольной массе легколетучего компонента. Средние мольные массы жидкости в верхней и нижней частях колонны соответственно равны:

$$M_{\text{верх}} = M_a \cdot x_{\text{ср.в}} + M_c \cdot (1 - x_{\text{ср.в}}) \quad (12)$$

$$M_{\text{ниж}} = M_a \cdot x_{\text{ср.н}} + M_c \cdot (1 - x_{\text{ср.н}}) \quad (13)$$

где, $x_{\text{ср.в}}$ и $x_{\text{ср.н}}$ – средний мольный состав жидкости в верхней и нижней частях колонны:

$$x_{\text{ср вер}} = \frac{X_D + X_F}{2} \quad (14)$$

$$X_{\text{ср вер}} = \frac{0,999 + 9,291 \cdot 10^{-5}}{2} = 0,4995 \text{ кмоль/кмоль} \cdot \text{см}$$

$$X_{\text{ср низ}} = \frac{X_F + X_W}{2} \quad (15)$$

$$X_{\text{ср низ}} = \frac{9,291 \cdot 10^{-5} + 13,273 \cdot 10^{-5}}{2} =$$

$$= 11,282 \cdot 10^{-5} \text{ кмоль/кмоль} \cdot \text{см}$$

Тогда

$$M_{\text{верх}} = 3,016 \cdot 0,4995 + 4,003 \cdot (1 - 0,4995) = 3,510 \text{ кг/кмоль}$$

$$M_{\text{ниж}} = 3,016 \cdot 11,282 \cdot 10^{-5} + 4,003 \cdot (1 - 11,282 \cdot 10^{-5}) =$$

$$= 4,343 \text{ кг/кмоль}$$

Мольная масса исходной смеси

$$M_F = 3,016 \cdot 9,291 \cdot 10^{-5} + 4,003(1 - 9,291 \cdot 10^{-5}) = 4,003 \text{ кг/кмоль}$$

Подставим рассчитанные величины в выражения для средних массовых расходов, получим:

$$L_B = \frac{D \cdot R \cdot M_B}{M_a} \quad (16)$$

$$L_B = \frac{0,7 \cdot 10^{-5} \cdot 11414 \cdot 3,510}{3,016} = 0,0930 \text{ кг/с}$$

$$L_H = \frac{DRM_H}{M_a} + \frac{F \cdot M_H}{M_c} \quad (17)$$

$$L_H = \frac{0,7 \cdot 10^{-5} \cdot 11414 \cdot 4,343}{3,016} + \frac{0,102945 \cdot 4,343}{4,003} = 0,2047 \text{ кг/с}$$

Средние массовые потоки пара в верхней $G_{\text{верх}}$ и нижней $G_{\text{низ}}$ частях колонны:

$$G_B = \frac{D \cdot (R + 1) \cdot M'_B}{M_a} \quad (18)$$

$$G_H = \frac{D \cdot (R + 1) \cdot M'_H}{M_a} \quad (19)$$

где M'_B и M'_H — средние мольные массы паров в верхней и нижней частях колонны

$$M'_B = M_a \cdot y_{\text{ср.в}} + M_c \cdot (1 - y_{\text{ср.в}}) \quad (20)$$

$$M'_H = M_a \cdot y_{\text{ср.н}} + M_c \cdot (1 - y_{\text{ср.н}}) \quad (21)$$

где

$$y_{\text{ср.в}} = \frac{y_D + y_B}{2} \quad (22)$$

$$y_{\text{ср.в}} = \frac{0,999 + 11,183 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,505$$

$$y_{\text{ср.н}} = \frac{y_B + y_W}{2} \quad (23)$$

$$y_{\text{ср.н}} = \frac{11,183 \cdot 10^{-3} + 13,273 \cdot 10^{-5}}{2} = 5,658 \cdot 10^{-3}$$

Тогда

$$M'_B = 3,016 \cdot 0,505 + 4,003 \cdot (1 - 0,505) = 3,505 \text{ кг/кмоль}$$

$$M'_H = 3,016 \cdot 5,658 \cdot 10^{-3} + 4,003 \cdot (1 - 5,658 \cdot 10^{-3}) = 3,997 \text{ кг/кмоль}$$

Подставив численные значения, получим:

$$G_B = \frac{0,7 \cdot 10^{-5} \cdot (11414 + 1) \cdot 3,505}{3,016} = 0,09285 \text{ кг/с}$$

$$G_H = \frac{0,7 \cdot 10^{-5} \cdot (11414 + 1) \cdot 3,997}{3,016} = 0,10589 \text{ кг/с}$$

6.4 Расчет диаметра колонны

Для ректификационных колон, работающих в плёночном режиме при повышенном давлении, рабочую скорость можно принять на 20 % – 30 % ниже скорости захлёбывания.

Придельную фиктивную скорость пара, при которой происходит захлёбывание колонны находим по формуле:

$$\frac{w^2 \cdot a \cdot \rho_y \cdot \mu_x^{0,16}}{g \cdot \varepsilon^3 \cdot \rho_x} = 1,2 \cdot \exp \left[-4 \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_x}{\rho_y} \right)^{0,125} \right] \quad (24)$$

Определим недостающие параметры:

а) Для пара $t_B = \text{минус } 272 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_H = \text{минус } 262 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Для жидкости $t_B = \text{минус } 271 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_H = \text{минус } 261 \text{ } ^\circ\text{C}$.

б) Тогда

$$\rho_{уВ} = \frac{M'_B}{22,4} \cdot \frac{T_0}{T_0 + t_B} \quad (25)$$

$$\rho_{уВ} = \frac{3,505}{22,4} \cdot \frac{273}{273 + (-272)} = 0,0784 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{уН} = \frac{M'_H}{22,4} \cdot \frac{T_0}{T_0 + t_H} \quad (26)$$

$$\rho_{уН} = \frac{3,997}{22,4} \cdot \frac{273}{273 + (-262)} = 0,0911 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_a = 0,179 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_c = 0,178 \text{ кг/м}^3$$

Вязкости:

$$\mu_a = 0,15 \text{ мПа} \cdot \text{с}; \mu_c = 0,3 \text{ мПа} \cdot \text{с};$$

$$\mu_{хВ} = 0,05 \text{ мПа} \cdot \text{с}; \mu_{хН} = 0,29 \text{ мПа} \cdot \text{с}$$

Для выбранной насадки, т.е. колец Рашига $50 \times 50 \times 5$:

$$\text{Удельная поверхность } a = 90 \text{ м}^2/\text{м}^3;$$

$$\text{Свободный объём } \varepsilon = 0,785 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$\text{Насыпная плотность } 530 \text{ кг/м}^3.$$

Предельная скорость паров:

$$\frac{w^2 \cdot 90 \cdot 0,0784 \cdot 0,05^{0,16}}{9,81 \cdot 0,785^3 \cdot 0,0911} = 1,2 \cdot \exp \left[-4 \cdot \left(\frac{0,2047}{0,10589} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{0,0784}{0,0911} \right)^{0,125} \right]$$

$$w_{пВ} = 0,034 \text{ м/с}$$

Аналогично:

$$w_{пН} = 0,029 \text{ м/с}$$

Принимаем рабочую скорость на 30 % ниже предельной:

$$w_B = 0,027 \text{ м/с}$$

$$w_H = 0,023 \text{ м/с}$$

Ориентировочный диаметр колонны определяют из уравнения расхода:

$$d = \sqrt{\frac{4G}{\pi \cdot w \cdot \rho_y}} \quad (27)$$

Как правило, несмотря на разницу в рассчитанных диаметрах укрепляющей и исчерпывающей частей колонны (вследствие различия скоростей и расходов паров), изготавливают колонну единого диаметра, равного большему из рассчитанных.

$$d_B = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,10589}{3,14 \cdot 0,34 \cdot 0,178}} = 1,49 \text{ м}$$

$$d_H = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,09285}{3,14 \cdot 0,29 \cdot 0,179}} = 1,50 \text{ м}$$

Выберем стандартный диаметр обечайки колонны из таблицы стандартных диаметров:

$$d_{\text{ст}} = 1600 \text{ мм [19].}$$

При этом рабочая скорость пара:

$$\omega_B = \omega \cdot \left(\frac{d}{d_{\text{ст}}} \right)^2 \quad (28)$$

$$\omega_B = 0,27 \cdot \left(\frac{1,49}{1,60} \right)^2 = 0,023 \text{ м/с}$$

$$\omega_H = \omega \cdot \left(\frac{d}{d_{\text{ст}}} \right)^2 \quad (29)$$

$$\omega_H = 0,23 \cdot \left(\frac{1,50}{1,60} \right)^2 = 0,020 \text{ м/с}$$

6.5 Расчет высоты насадки

$$H = n_{0y} \cdot h_{0y} \quad (30)$$

Где n_{0y} – общее число единиц переноса по паровой фазе;

h_{0y} – общая высота единицы переноса, м.

Общее число единиц переноса вычисляют по уравнению:

$$n_{0y} = \int_{yw}^{yd} \frac{dy}{y' - y} \quad (31)$$

Решим данный интеграл методом графического интегрирования.

Определяем состав пара в верхней и нижней части колонны, по уравнению рабочей линии:

а) верхней (укрепляющей) части колонны:

$$y = \frac{R}{R+1} \cdot x + \frac{X_d}{R+1} \quad (32)$$

б) нижней (исчерпывающей) части колоны

$$y = \frac{R+F}{R+1} \cdot x - \frac{F-1}{R+1} \quad (33)$$

Расчет представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Состав жидкости и пара

Для низа	y	y' - y	1/y' - y	x'	x - x'	m
	0,0101	0,0077	33,22	0,004	0,001	3,84
	0,0501	0,0874	9,66	0,014	0,032	2,50
	0,1001	0,1298	6,33	0,031	0,058	1,94
	0,2001	0,2086	3,734	0,080	0,097	1,90
	0,4001	0,0448	20,03	0,170	0,038	1,12
Для верха						
	0,4999	0,0352	30,69	0,244	0,068	0,54
	0,5999	0,0503	18,27	0,417	0,062	0,78
	0,6999	0,0352	23,41	0,576	0,059	0,54
	0,7999	0,0181	42,25	0,755	0,031	0,51
	0,8999	0,0141	62,50	0,872	0,028	0,47

m – средний коэффициент распределения в условиях равновесия

$$m_{срв} = 0,57$$

$$m_{срн} = 2,26$$

Результаты вычисления площади криволинейной трапеции:

$$n_{0в} = 4,76 - \text{для верхней части колонны}$$

$$n_{0н} = 6,98 - \text{для нижней части колонны}$$

$$n_0 = n_{0в} + n_{0н} \quad (34)$$

$$n_0 = 4,76 + 6,98 = 11,74$$

Отношение нагрузок по пару и жидкости:

$$\text{для верха } \frac{G}{L} = \frac{R + 1}{R} \quad (35)$$

$$\frac{G}{L} = \frac{11414 + 1}{11414} = 1,00$$

$$\text{для низа } \frac{G}{L} = \frac{R + 1}{R + f} \quad (36)$$

$$\text{где } f = \frac{F \cdot M_a}{P \cdot M_F} \quad (37)$$

$$f = \frac{0,102930 \cdot 3,016}{0,000007 \cdot 4,003} = 11078$$

$$\frac{G}{L} = \frac{11414 + 1}{11414 + 11078} = 0,51$$

$$h_{0y} = 0,51$$

Расчет общей высоты насадки

$$H_H = n_0 \cdot h_0 \quad (38)$$

$$H_H = 11,74 \cdot 0,51 = 5,87 \approx 6 \text{ м} = 6000 \text{ мм}$$

Высоту ректификационной колонны определим по формуле

$$H_K = H_H + z_B + z_H \quad (39)$$

где z_B и z_H – расстояние соответственно между верхней тарелкой и крышкой колонны и между дном колонны и нижней тарелкой, м.

Приняты следующие значения $z_B = 1000$ мм и $z_H = 1000$ мм.

Подставив, получим:

$$H_K = 6 + 1 + 1 = 8 \text{ м} = 8000 \text{ мм}$$

Расчет объема колонны:

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot H_K \quad (40)$$

$$V = \frac{3,14 \cdot 1,6^2}{4} \cdot 8 = 16,08 \text{ м}^3$$

7 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

7.1 Риски, связанные с производством на криогенной установке

В данной дипломной работе изучаются теоретические основы выделения гелий-3 из товарного гелия АмГПЗ. Сырьем в криогенном методе разделения является товарный гелий (гелий-4), а продуктом гелий-3 с минимальным количеством примесей. На установке отсутствуют взрывоопасные, радиоактивные, пожароопасные и токсичные газы. Поэтому основным опасным фактором данной установки является утечка гелия с последующим вытеснением кислорода из воздуха.

Рассмотрим основные потенциальные опасности, связанные с особенностями используемого оборудования и трубопроводов:

- термические ожоги при контакте с нагретыми поверхностями паропроводов и теплоспутников при поврежденной или отсутствующей изоляции;
- обморожения при контакте с испаряющимися криогенными жидкостями;
- выход из строя компрессоров вследствие значительного осевого смещения;
- коррозионное разрушение материалов аппаратов, насосов, компрессоров и трубопроводов;
- повреждение оборудования из-за размораживания;
- повреждение оборудования при резких перепадах температуры и давления в процессе запуска и остановки;
- повреждение трубопроводов из-за внутренних напряжений, возникающих при неправильном монтаже или использовании материалов, не соответствующих проектным требованиям;

					ВКР.248737.180301.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Разработка теоретических основ выделения гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты производства Амурского ГПЗ как стратегически важного продукта для экономики	Лит.	Лист	Листов
Разраб.	Толмачева О.Д.					у	57	69
Провер.	Гужель Ю.А.					АмГУ ИКиИН 1107-об гр.		
Н. контр.	Родина Т.А.							
Утверд.	Гужель Ю.А.							

- разрушение трубопроводов, вызванное вибрациями вследствие гидроударов;
- соприкосновения с элементами оборудования, работающего при экстремально низких температурах;
- движущиеся компоненты промышленной техники;
- формирование ледяных наростов в трубах и неиспользуемых отрезках сети в холодное время года;
- повышенный уровень шума и вибрации.

Несмотря на ряд угроз, связанных с криогенным оборудованием выделения гелий-3, одной из ключевых проблем является увеличение концентрации газа в воздухе рабочей зоны, обусловленный его утечками.

На основании ТУ 0271-135-31323949-2005 «Гелий газообразный (сжатый). Технические условия» гелий является не токсичным, не горючим и не взрывоопасным. Гелий в газообразном состоянии не оказывает прямого физиологического воздействия на организм. Тем не менее, если концентрация гелия в воздухе становится высокой, а содержание кислорода падает ниже 19 %, возникает дефицит кислорода. При критическом снижении уровня кислорода может наступить удушье. Поскольку гелий легче воздуха, он имеет тенденцию скапливаться в верхней части помещений с плохой вентиляцией [20].

В зонах, где возможно скопление гелия, необходимо регулярно проверять уровень кислорода в воздухе. Для этого следует использовать автоматические или ручные приборы с возможностью дистанционного забора проб воздуха. Содержание кислорода в воздухе должно поддерживаться на уровне не менее 19 %.

Для обеспечения безопасности персонала необходимо, чтобы оборудование и аппаратура были герметичными. Производственные помещения должны быть оборудованы системой вентиляции, соответствующей требованиям ГОСТ 12.4.021-75 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы вентиляционные. Общие требования» [21].

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

В случае резкого выброса гелия в атмосферу, существует потенциальная опасность удушья вблизи источников выбросов и в ограниченных пространствах. Причиной является возможное повышение концентрации гелия, что приводит к снижению уровня кислорода в воздухе до критически низких значений. Недостаток кислорода в воздухе оказывает серьезное воздействие на организм. Когда концентрация кислорода снижается до 16 % – 17 %, дыхание становится более глубоким, но при этом ухудшается внимание и нарушается моторика. Дальнейшее снижение кислорода до 12 % – 15 % вызывает одышку, учащенное сердцебиение, снижение умственной работоспособности и быструю утомляемость. При концентрации кислорода 9 % – 11 % человек остается в сознании, но испытывает сильную слабость и тошноту, а дыхание становится прерывистым. Если уровень кислорода падает до 8 %, происходит быстрая потеря сознания. Концентрация кислорода ниже 6 % смертельна и приводит к смерти в течение нескольких минут.

7.2 Общая характеристика опасностей на производстве

С целью исключения ситуаций, способных привести к серьезным травмам или летальному исходу работников, при эксплуатации установки необходимо неукоснительно соблюдать требования безопасности. Для снижения уровня опасности и вредности производственного процесса реализуется комплекс мер, включающий:

- размещение технологического оборудования преимущественно на открытых площадках, что способствует рассеиванию возможных утечек газа и облегчает доступ для аварийно-спасательных служб;
- оснащение всего оборудования предохранительными клапанами, предназначенными для автоматического сброса избыточного давления и предотвращения аварийных ситуаций, связанных с превышением допустимых параметров;
- выполнение электроустановок с применением изоляции, соответствующей категории производственного процесса, а также обеспечение защиты

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

оборудования и трубопроводов от накопления статического электричества;

- осуществление контроля и регулирования всех параметров технологического процесса дистанционно, оператором из специально оборудованного помещения, посредством автоматизированной системы управления;

- обеспечение безопасного доступа персонала к оборудованию для проведения обслуживания и ремонтных работ путем оснащения установки специальными площадками и лестницами.

Амурский газоперерабатывающий завод на основании Федерального закона от 21.07.1997 №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» классифицируется как ОПО I класса опасности. Это связано с тем, что на заводе обращаются большие объемы горючих и криогенных веществ, проводятся опасные технологические процессы и высокий потенциал аварийного воздействия [22].

Для минимизации рисков на Амурском ГПЗ критически важно обеспечить:

- точное соблюдение технологических режимов (температура, давление, расход сырья);

- бесперебойную работу и регулярную проверку контрольно-измерительных приборов, систем автоматизации, сигнализации и блокировок;

- постоянный контроль герметичности оборудования и исправности арматуры;

- надежное заземление электрооборудования и трубопроводов;

- своевременное проведение планово-предупредительных ремонтов;

- высокий уровень подготовки персонала, подтвержденный регулярным обучением и тренировками по действиям в аварийных ситуациях;

- строгое соблюдение правил безопасности при работе с криогенными жидкостями и использование средств индивидуальной защиты.

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

7.3 Средства индивидуальной и коллективной защиты

Для эффективной защиты персонала установки от вредного и опасного воздействия необходимо применять как коллективные, так и индивидуальные средства защиты в комплексе. В связи с этим, были рассмотрены основные средства защиты обоих типов, предназначенные для предотвращения и минимизации последствий утечки гелия в атмосферу.

Все сотрудники, работающие на установке, должны быть обеспечены специальной одеждой и средствами индивидуальной защиты, в соответствии с приказом Минздравсоцразвития РФ № 766н от 29.10.2021. соответствующими требованиям ГОСТ 12.4.011-89 «Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация». Особенно важным СИЗ при утечке гелия является переносной дыхательный аппарат, позволяющий быстро эвакуироваться из зоны риска. Применение этих мер коллективной и индивидуальной защиты гарантирует безопасность персонала, повышает эффективность работы и минимизирует риск возникновения аварийных ситуаций [23].

Так как основным источником потенциальных утечек гелия в системе является возможная разгерметизация оборудования. Для минимизации таких рисков и обеспечения безопасной эксплуатации на установке реализован комплекс инженерно-технических решений:

- все аппараты и трубопроводы рассчитаны на давление, существенно превышающее рабочее, применены материалы, устойчивые к низкотемпературному охрупчиванию;
- установлены предохранительные клапаны с многоуровневой системой блокировок: первичная (при 90 % от допустимого давления), аварийная (при 95 % от допустимого давления) и полное отключение (при 100 % от допустимого давления). Использование системы автоматического включения precisely-вытяжной вентиляции при обнаружении утечки;
- установлены датчики контроля загазованности в местах потенциально

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
						61
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

опасных зонах. Используется система оповещения персонала.

Для обеспечения безопасной и бесперебойной работы оборудования и предотвращения аварийных ситуаций необходимо:

- осуществлять непрерывный мониторинг ключевых параметров процесса (давления, температуры, расходов). Поддерживать рабочие параметры в строго заданных пределах с использованием автоматизированных систем управления;
- установить автоматические блокировки и защитные отсечки. Реализовать многоступенчатую систему аварийного отключения;
- проводить планово-предупредительные ремонты согласно регламентам. Применять методы неразрушающего контроля для диагностики состояния. Вести электронный журнал обслуживания и ремонтов. Своевременно заменять изношенные узлы и компоненты;
- организовать многоуровневую систему пропускного режима. Установить системы видеонаблюдения и контроля доступа. Проводить регулярные инструктажи по технике безопасности.

В соответствии с Федеральным законом от 28.12.2013 N 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» АмГПЗ имеет класс 3.2 из-за воздействия на работников производственного шума от 85 до 95 дБА [24].

Поэтому для защиты персонала от воздействия шума применяются следующие меры:

- удаление источников шума на безопасное расстояние, при котором уровень звукового давления не превышает нормативных значений;
- звукоизоляция источников шума;
- использование глушителей и диффузоров;
- применение средств индивидуальной защиты органов слуха.

Уровень вибрации оборудования на установках Амурского ГПЗ при соблюдении технологического режима находится в пределах допустимых норм.

Система контроля содержания кислорода в воздухе рабочей зоны предна-

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

значена для своевременного выявления утечек гелия и предотвращения опасной загазованности. Датчики кислорода фиксируют снижение концентрации: при достижении 23 % выдается предупредительный сигнал, при 19 % – аварийный сигнал с автоматической остановкой оборудования. Сигналы дублируются локально и в операторской, при этом аварийные сигналы имеют цветовую и звуковую индикацию. Сброс газа под давлением в атмосферу осуществляется на безопасном удалении от мест возможного нахождения персонала. Система глушения, как правило, интегрирована в верхнюю точку установки, обеспечивая централизованный и удаленный от персонала сброс газа.

Соблюдение указанных мер коллективной и индивидуальной защиты обеспечивает безопасность и эффективность работы персонала, а также снижает вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций.

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы изучены свойства гелия, его изотопов и методы выделения гелия-3 из товарного газа. Рассмотрены методы выделения гелия такие как: фракционная дистилляция, адсорбция, мембранная сепарация, магнитные методы и криогенная ректификация, и его изотопов, каждый из которых обладает своими преимуществами и ограничениями. Установлено что криогенные технологии обеспечивают высокую степень очистки, но требуют значительных энергозатрат, в то время как мембранные методы более экономичны, но менее эффективны при низких концентрациях гелия.

Рассчитана насадочная ректификационная колонна необходимая для выделения гелий-3 из товарного гелия, полученного на Амурском ГПЗ. Выполнен чертеж технологической схемы и представлено её описание. В процессе выполнения работы составлен материальный баланс и выполнены следующие расчёты: рабочее флегмовое число, диаметра колонны, ее высоты, высота насадки и общий объем колонны.

Выполнен расчёт насадочной ректификационной колонны с основными размерами диаметр 1600 мм, высотой 8000 мм, с числом разрывов 2 и с высотой насадочного слоя равным 6000 мм.

Актуальность работы обусловлена растущим дефицитом этого редкого и ценного изотопа на мировом рынке, а также его широким спектром применения в науке и промышленности.

В заключение можно отметить, что дальнейшие исследования и разработки в этой области позволят усовершенствовать технологии выделения и применения гелия, что откроет новые возможности для его использования в науке и промышленности.

					ВКР.248737.180301.ПЗ					
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Разработка теоретических основ выделения гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты производства Амурского ГПЗ как стратегически важного продукта для экономики			Лит.	Лист	Листов
Разраб.	Толмачева О.Д							У	64	69
Провер.	Гужель Ю.А.							АмГУ ИКиИН 1107-об гр.		
Н. контр.	Родина Т.А.									
Утверд.	Гужель Ю.А.									

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Амурский газоперерабатывающий завод [Электронный ресурс] : «АмГПЗ». – Режим доступа: <https://www.gazprom.ru/projects/amur-gpp/>. – 12.04.2025
- 2 Гелий [Электронный ресурс] : «Большая российская энциклопедия». – Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/gelii-9d40bf>. – 15.04.2025
- 3 Якуцени, В. П. Геология гелия / В. П. Якуцени. – Л : «Недра», Ленингр. отд-ние, 1968. – 232 с.
- 4 Голубева, И. А. Удивительный гелий; история открытия в лицах / И. А. Голубева, Р. Р. Ниигард, Н. И. Казаченко // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2014. – № 12. – С. 18–32.
- 5 Якуцени, В. П. Традиционные и перспективные области применения гелия / В. П. Якуцени // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2009. – № 4. – С. 1–13.
- 6 Жидкий гелий в сканерах для МРТ [Электронный ресурс] : «Радиомед Центр». – Режим доступа: <https://radio-med.ru/publikaczii/zhidkij-gelij-v-mrt/>. – 20.04.2025
- 7 Необычное использование гелия в науке, искусстве и развлечениях [Электронный ресурс] : «Гермес-газ». – Режим доступа: <https://geliy.hermes-gas.ru/blog/neobychnoe-ispolzovanie-geliya-v-nauke-iskusstve-i-razvlecheniyah>. – 20.04.2025
- 8 Рожков, С. С. Динамика параметра порядка сверхтекучих фаз гелия-3 / С. С. Рожков // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 148, вып. 2. – С. 325–345.

					ВКР.248737.180301.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	Толмачева О.Д.				Разработка теоретических основ выделения гелия-3 из товарного гелия высокой чистоты производства Амурского ГПЗ как стратегически важного продукта для экономики	Лит.	Лист	Листов
Провер.	Гужель Ю.А.					у	65	69
Н. контр.	Родина Т.А.					АмГУ ИКиИН 1107-об гр.		
Утверд.	Гужель Ю.А.							

9 Гелий-3: потенциальное топливо для термоядерной энергии [Электронный ресурс] : «Гермес-Газ». – Режим доступа: <https://geliy.hermes-gas.ru/blog/gelij-3-potencialnyj-toplivo-dlya-termoyadernoj-ehnergii/>. –

07.03.2025

10 Гелий-3 [Электронный ресурс] : «Spacegid.com». – Режим доступа: https://spacegid.com/helium-3.html#_-3-2/. – 10.03.2025

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

12 Кисленко, Н. Н. Создание установки мембранного выделения гелия на Чаяндинском НГКМ / Н. Н. Кисленко, В. В. Павленко // Газохимия на современном этапе развития: труды Московского семинара по газохимии, 2018–2019 гг. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина. 2020. – Вып. 10. – С. 75–91.

13 Тритий. Теория, практика, последствия : моногр. / Л. Г. Бондарева, [и др] ; Апатиты : Кольский научный центр Российской академии наук, 2024. – 359 с.

14 Пат. 2830470 Российской Федерации, F25J 3/029. Способ получения изотопа гелия-3 из природного гелия и устройство для его осуществления / В. Л. Бондаренко, М. Ю. Куприянов, А. И. Верховный, К. К. Сирота, А. Г. Куцко ; Публичное акционерное общество «Газпром» – № 2024115102 ; Заявл. 31.05.2024 ; Оpubл. 19.11.2024, Бюл № 32.

15 Пат. 2710969 Российской Федерации, МПК C01B 23/00, F25J 3/02, F25J 1/00, B01D 59/00. Установка для извлечения ^3He из товарного жидкого гелия методом ректификации / И. Ф. Кузьменко, А. В. Кортиков, Е. Ю. Тарасова ; Публичное акционерное общество криогенного машиностроения (ПАО «Криогенмаш») – № 2018139551 ; Заявл. 09.11.2018 ; Оpubл. 14.01.2020, Бюл № 2.

16 Васильева, И. А. Теплофизические свойства веществ / И. А. Васильева,

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

Д. П. Волков, Ю. П. Заричняк. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. – 80 с.

17 ТУ 0271-005-45905715-2011. Технические условия на газообразный (сжатый) гелий, марка Б. – Взамен ТУ 51-940-80; введ. 2006–01–01. – Оренбург : Оренбургский центр стандартизации, метрологии и сертификации ; М. : Изд-во стандартов, 2011. – 19 с.

18 ГОСТ 949-73. Стальные баллоны малого и среднего объема для газов на $P_r \leq 19,6$ МПа (200 кгс/см²). Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 12 с.

19 ТУ 0271-135-31323949-2005. Технические условия на газообразный (сжатый) гелий. – Взамен ТУ 51-940-80; введ. 2006–01–01. – Оренбург : Оренбургский центр стандартизации, метрологии и сертификации ; М. : Изд-во стандартов, 2005. – 31 с.

20 ГОСТ 12.4.021-75. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вентиляционные системы. Введ. 1977–01–01. – М. Изд-во стандартов, 1975. – 6 с.

21 Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изменениями на 14 ноября 2023 г.). – Собрание законодательства Российской Федерации, 1997, № 30, ст. 3588.

22 ГОСТ 12.4.011-89. Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1990. – 11 с.

23 Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда». – Собрание законодательства Российской Федерации, 2013, № 52 (ч. I), ст. 6867.

24 Каталог оборудования. Раздел V. Колонные аппараты [Электронный ресурс]: ООО «СпецМашСервис». – Режим доступа: <https://spetsmashservis.narod.ru/docum/catalogKOL.pdf/>. – 17.05.2025

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

25 Рабинович, В. А. Краткий химический справочник: справочное издание / В. А. Рабинович, З. Я. Хавин / под ред. А. А. Потехина, А. И. Ефимова. — 3-е изд., перераб. и доп. — Л.: Химия, 1991. — 432 с.

26 Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. — 10-е изд. / А. Г. Касаткин. — М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. — 752 с.

27 Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии: учебник для вузов. / А. И. Скобло [и др]. — М.: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2012. — 725 с.

28 Голубева, И. А. Гелий в России сегодня: проблемы и пути решения / И. А. Голубева, А. Н. Настин, В. И. Соломахин, В. В. Павловский // Газовая промышленность. — 2021. — № 4 (Т. 815). — С. 70–78.

29 Буронов, Ф. Э. Сущность и преимущества мембранного разделения гелийсодержащих природных газов / Ф. Э. Буронов, Д. Д. Шукруллаев // Экономика и социум. — 2023. — № 4 (Т. 107). — С. 485–489.

30 Пат. 2576768 Российской Федерации, МПК F25B 1/00. Гелиевый рефрижератор с избыточным обратным потоком для производства холода на двух температурных уровнях / А. И. Агеев ; Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации - Институт физики высоких энергий» Национального исследовательского центра «Курчатовский Институт» - № 2014101098/06 ; Заявл. 14.01.2014 ; Оpubл. 20.07.2016, Бюл № 7.

31 Пат. 173384 Российской Федерации, МПК C01B 23/00, F25J 3/00. Устройство для получения концентрата ^3He из природного гелия / М. Ю. Куприянов, В. Л. Бондаренко ; ООО «Царская привилегия». — № 2017101772 ; Заявл. 19.01.2017 ; Оpubл. 24.08.2017, Бюл № 24.

32 Якуцени, В. П. Сырьевая база гелия: состояние, перспективы освоения и использования / В. П. Якуцени // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2001. — № 2. — С. 1–24.

					ВКР.248737.180301.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

33 Русецкая, Г. Д. Проблемы и перспективы гелиевой промышленности России / Г. Д. Русецкая, А. А. Юрышев // Известия Байкальского государственного университета. – 2021. – Т. 31, № 4. – С. 448–458.

34 Пат. 114423 Российской Федерации, МПК В01D 63/00, В01D 63/02. Установка для очистки природного газа высокого давления от гелия / М. А. Гулянский, Н. Л. Докучаев, А. А. Котенко ; ООО «Газпром развитие». – № 2011145825/05 ; Заявл. 11.11.2011 ; Оpubл. 27.03.2012, Бюл № 9.

35 Пат. 150520 Российской Федерации, МПК В01D 53/00. Устройство для извлечения гелия из природного газа под повышенным давлением: варианты / В. И. Соломахин, Ю. С. Давыдов ; ДОО ЦКБН ОАО «Газпром». – № 2014121148/05 ; Заявл. 26.05.2014 ; Оpubл. 20.02.2015, Бюл № 5.

36 Бондаренко, В. Л. Оценка затрат на получение изотопа ^3He из природного гелия криогенными методами / В. Л. Бондаренко, А. П. Графов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2012. – С. 54–61.

37 Вагарин, В. А. Инновационное развитие технологий выделения гелия в РФ // Химические технологии и продукты. – 2023. – С. 26–30.

38 Пат. 1413383 Российской Федерации, МПК F25B 9/02, F25B 9/12, F25J 1/02. Способ получения сверхнизких температур и установка для его осуществления / Михеев В. А., Майданов В. А., Михин Н. П., Репин В. Н. ; Всесоюзный научно-исследовательский институт гелиевой техники. – № 4899278/06 ; Заявл. 20.07.1984 ; Оpubл. 30.07.1984, Бюл № 1.

39 Лашинский, А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А. А. Лашинский, А. Р. Толчинский. – Л.: Машгиз, 1970. – 753 с.

40 Иоффе, И. Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии / И. Л. Иоффе. – Л.: Химия, 1991. – 352 с.