

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа: Инженерная школа природных ресурсов  
 Направление подготовки (специальность): 21.03.01 Нефтегазовое дело  
 Отделение школы (НОЦ): Отделение нефтегазового дела

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

| Тема работы   |
|---|
| <b>АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ<br/>           МЕМБРАННЫХ СИСТЕМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГЕЛИЯ ИЗ ПРИРОДНОГО<br/>           ГАЗА В ПРОЦЕССЕ РАЗРАБОТКИ ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ</b> |

УДК 622.279.8:661.939.1

Студент

| Группа | ФИО                          | Подпись | Дата |
|--------|------------------------------|---------|------|
| 2Б7П   | Свинухов Богдан Владимирович |         |      |

Руководитель

| Должность             | ФИО                        | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------------------|----------------------------|---------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель | Максимова Юлия Анатольевна |                           |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО                    | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|------------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент    | Спицина Любовь Юрьевна | К.Э.Н.                    |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность             | ФИО                  | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------------------|----------------------|---------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель | Фех Алина Ильдаровна |                           |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Руководитель ООП      | ФИО                        | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------------------|----------------------------|---------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель | Максимова Юлия Анатольевна |                           |         |      |

Томск – 2021 г.

**Планируемые результаты обучения**

| <b>Код</b> | <b>Результат освоения ООП</b>   | <b>Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон</b>   |
|------------|---|--|
| P1         | Применять базовые естественнонаучные, социально-экономические, правовые и специальные знания в области нефтегазового дела, самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности                  | Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ОК(У)-1, ОК(У)-2, ОК(У)-4, ОК(У)-6, ОК(У)-7, ОК(У)-8, ОПК(У)-1, ОПК(У)-2)  |
| P2         | Решать профессиональные инженерные задачи на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности  | Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ ОК(У)-3), ОК(У)-5, ОК(У)-9, ОПК(У)-5, ОПК(У)-6)   |
| P3         | Осуществлять и корректировать технологические процессы при эксплуатации и обслуживании оборудования нефтегазовых объектов   | Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ПК(У)-1, ПК(У)-2, ПК(У)-3, ПК(У)-6, ПК(У)-7, ПК(У)-8, ПК(У)-10, ПК(У)-11)  |
| P4         | Выполнять работы по контролю промышленной безопасности при проведении технологических процессов нефтегазового производства и применять принципы рационального использования природных ресурсов, а также защиты окружающей среды в нефтегазовом производстве | Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ, (ПК(У)-4, ПК(У)-5, ПК(У)-9<br>ПК(У)-12, ПК(У)-13, ПК(У)-14, ПК(У)-15)  |
| P5         | Получать, систематизировать необходимые данные и проводить эксперименты с использованием современных методов моделирования и компьютерных технологий для решения расчетно-аналитических задач в области нефтегазового дела                                  | Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ОПК(У)-4, ПК (У)-23, ПК (У)-24)  |
| P6         | Использовать стандартные программные средства для составления проектной и рабочей и технологической документации в области нефтегазового дела   | Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ ОК(У)-4, ОПК(У)-3, ОПК(У)-5, ОПК(У)-6, ПК(У)-25, ПК(У)-26)  |
| P7         | Работать эффективно в качестве члена и руководителя команды, формировать задания и оперативные планы, распределять обязанности членов команды, нести ответственность за результаты работы при разработке и эксплуатации месторождений                       | Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ОПК(У)-4, ПК(У)-9, ПК(У)-14), требования профессионального стандарта 19.021 Специалист по промышленной геологии  |
| P8         | Управлять технологическими процессами, обслуживать оборудование, использовать любой имеющийся арсенал технических средств, обеспечивать высокую эффективность при разработке и реализации проектов нефтегазовых объектов                                    | Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ОПК(У)-5, ОПК(У)-6, ПК(У)-9, ПК(У)-11), требования профессионального стандарта 19.007 Специалист по добыче нефти, газа и газового конденсата   |
| P9         | Повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности на опасных производственных объектах, соблюдать правила охраны труда и промышленной безопасности, выполнять требования по защите окружающей среды                               | Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ОПК(У)-6, ОПК(У)-7, ПК(У)-4, ПК(У)-7, ПК(У)-13), требования профессионального стандарта 19.007 Специалист по добыче нефти, газа и газового конденсата, 19.021 Специалист по промышленной геологии. |

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа: Инженерная школа природных ресурсов  
 Направление подготовки (специальность): 21.03.01 Нефтегазовое дело  
 Отделение школы (НОЦ): Отделение нефтегазового дела

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

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

В форме:

|   |
|---|
| Бакалаврской работы   |
| <small>(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)</small> |

Студенту:

| Группа | ФИО                          |
|--------|------------------------------|
| 2Б7П   | Свинухов Богдан Владимирович |

Тема работы:

|  |                       |
|--|-----------------------|
| Анализ технологических параметров работы мембранных систем извлечения гелия из природного газа в процессе разработки газовых месторождений |                       |
| Утверждена приказом директора (дата, номер)  | 89-12/с от 30.03.2021 |

|  |            |
|--|------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 17.06.2021 |
|--|------------|

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|  |   |
|--|---|
| <b>Исходные данные к работе</b>  | Тексты и графические материалы отчетов и исследовательских работ, фондовая и научная литература, технологические регламенты, нормативные документы.   |
| <b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>                              | Обзор существующих методов выделения гелиевого концентрата. Анализ физико-химических свойств гелия. Анализ пластовых условий в зонах залегания. Область применения гелия в различных сферах производства. Анализ классификации природного газа по степени содержания гелия в нём. |
| <b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b><br><small>(с указанием разделов)</small> |   |
| <b>Раздел</b>  | <b>Консультант</b>  |

|   |   |
|---|---|
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение   | Доцент ОСГН ШБИП ТПУ, к.э.н. Спицина Любовь Юрьевна |
| Социальная ответственность  | Старший преподаватель, Фех Алина Ильдаровна         |
| <b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>                                 |   |
| Современный подход выделения гелия из природного газа   |   |
| Анализ существующих технологий выделения гелия из состава природного газа   |   |
| Сравнительный анализ технологий и рекомендации по выбору оптимального метода выделения гелия из состава природного газа |   |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение   |   |
| Социальная ответственность  |   |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b> | 31.03.2021 |
|---|------------|

**Задание выдал руководитель:**

| Должность             | ФИО                        | Ученая степень, звание | Подпись | Дата       |
|-----------------------|----------------------------|------------------------|---------|------------|
| Старший преподаватель | Максимова Юлия Анатольевна |                        |         | 31.03.2021 |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                          | Подпись | Дата       |
|--------|------------------------------|---------|------------|
| 2Б7П   | Свиныхов Богдан Владимирович |         | 31.03.2021 |

## **ОБОЗНАЧЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ**

**ГПЗ** – газоперерабатывающий завод

**ГК** – гелиевый концентрат

**ПГОГ** – природный газ, обогащенный гелием

**ГСО-ПГМ** – стандартный образец утвержденного типа природного газа магистрального

**ПНГ** – попутный нефтяной газ

**СПГ** – сжиженный природный газ

**УМВГК** – установка мембранного выделения гелиевого концентрата

**НГКМ** – нефтегазоконденсатное месторождение

**ГПК** – газоперерабатывающий комплекс

**ШФЛУ** – широкая фракция легких углеводородов

**СИЗ** – средства индивидуальной защиты

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 98 страниц, в том числе 12 рисунков, 19 таблиц. Список литературы включает 28 источников. Работа содержит 1 приложение.

Ключевые слова: гелий, гелиевый концентрат, природный газ, мембранная технология, криогенный метод.

Объектом исследования являются технологии выделения гелия из состава природного газа.

Цель исследования – анализ технологических параметров работы мембранных систем выделения гелия из природного газа в процессе разработки газовых месторождений.

В процессе исследования были рассмотрены существующие технологии выделения гелиевого концентрата, проанализированы основные производственные характеристики данных систем. Проведен анализ технологии мембранного выделения гелиевого концентрата и рассмотрены перспективы в использовании современных установок на основе мембранного разделения.

В результате проведенного анализа был выявлен положительный эффект от внедрения модульных установок мембранного выделения гелиевого концентрата. Введение в эксплуатацию данного типа установок непосредственно на промысле позволяет сократить временные издержки на транспортировку, кроме того, сокращается вероятность истечения гелиевого газа в атмосферу во время транспортировки по трубопроводам на перерабатывающий завод, так как все процессы выделения гелиевого концентрата происходят на промысле.

Область применения: очистка природного газа, производство гелия

Потенциальная экономическая эффективность связана с сокращением затрат на строительство и обслуживание трубопроводов для транспортировки природного газа с высоким содержанием легколетучего гелия на ГПЗ и снижением себестоимости производства гелия за счет отказа от дорогостоящих методов криогенного газоразделения.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 9  |
| 1.СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД ВЫДЕЛЕНИЯ ГЕЛИЯ ИЗ ПРИРОДНОГО ГАЗА  |    |
| 11   |    |
| 1.1 Гелий: физико-химические свойства, пластовые условия в зонах залегания гелия, анализ геологических условий. ....             | 14 |
| 1.2 Опыт промышленного применения гелия в России и за рубежом .....  | 23 |
| 1.3 Анализ степени изученности методов выделения гелиевого концентрата в России и за рубежом .....                               | 26 |
| 2.АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫДЕЛЕНИЯ ГЕЛИЯ ИЗ СОСТАВА ПРИРОДНОГО ГАЗА.....   | 30 |
| 2.1Криогенный метод разделения природного газа .....   | 30 |
| 2.2Технология мембранного разделения природного газа на компоненты .....   | 34 |
| 2.3Метод газогидратного обогащения природного газа гелием .....  | 58 |
| 3.СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА ВЫДЕЛЕНИЯ ГЕЛИЯ ИЗ СОСТАВА ПРИРОДНОГО ГАЗА .....  | 60 |
| 4.ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....   | 66 |
| 4.1 Предлагаемые технические решения для реализации процесса выделения гелия из состава природного газа на Чаяндинском НГКМ..... | 66 |
| 4.2 Технология QuaD .....  | 68 |
| 4.3 Бюджет мембранной технологии извлечения гелия из состава природного газа   | 69 |
| 4.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности технологии.....                       | 72 |
| 4.5 SWOT-анализ.....   | 74 |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.6 Разработка графика анализа технологии .....   | 76        |
| 4.7 Вывод по экономическому разделу.....  | 78        |
| <b>5.СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....</b>  | <b>81</b> |
| 5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....                                       | 82        |
| 5.2 Производственная безопасность.....  | 83        |
| 5.3 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровня воздействия ..... | 84        |
| 5.4 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровня воздействия ..... | 87        |
| 5.5 Экологическая безопасность.....   | 89        |
| 5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....  | 91        |
| Вывод по разделу «Социальная ответственность».....  | 92        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>   | <b>93</b> |
| <b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>   | <b>95</b> |
| Приложение А .....  | 98        |

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день природный газ, который представляет собой смесь различных ценных компонентов, во многом определяет мировую промышленность. Потребление газа в период 2016-2020 годов составило 3709 млрд. м<sup>3</sup> что на 300 млрд. м<sup>3</sup> больше чем в аналогичный период 2011-2015 годов. Спрос на природный газ согласно прогнозу Минэкономразвития России в следующее десятилетие будет только расти. Это обусловлено в первую очередь большей экологичностью в сравнении с нефтью, растущим спросом на природный газ в больших индустриальных странах, таких как, Китай и Индия, а также на данный процесс повлиял отход от ядерной энергетики во многих странах Европы и мира после ядерных аварий, приносящих катастрофический ущерб окружающей среде и человеку.

Выделение компонентов из состава природного газа одна из главных задач производства. Их используют в большом количестве различных сфер начиная с топливно-энергетической и заканчивая сферой высоких технологий. Для поддержания работоспособности последней, а также для развития медицины, производства дыхательных смесей, развития ядерных технологий и многого другого необходим гелий.

Еще в начале двадцатого века в России гелий был определен как стратегически важный ресурс. Однако сегодня мировое производство гелия сокращается. Это связано с тем, что рынок получает необходимое количество этого газа для нужд промышленности. Но его производство будет продолжаться, так как гелий, в подавляющем большинстве случаев, является примесью природного газа. Ввиду того что гелий является ценным сырьевым ресурсом, его значительные потенциально нереализуемые объемы, полученные при разработке месторождений гелийсодержащего газа, должны быть сохранены. При этом целесообразно организовывать долгосрочное хранение путем закачки обогащенного гелием потока в разрабатываемую залежь.

Актуальность данной работы заключается в том, что добыча природного газа в настоящее время увеличивается, в связи с чем существует необходимость в создании технологий, позволяющих обеспечить требуемый уровень очистки газа от примесей, с помощью которых возможно получение, в том числе, гелия высокой чистоты, который является не возобновляемым и стратегически важным ресурсом для экономики государства.

Целью выпускной квалификационной работы является анализ существующих систем извлечения гелия из состава природного газа.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Определить условия образования гелия, его физико – химические свойства, пластовые условия в зонах залегания гелия;
2. Проанализировать рынок потребления гелия в России и за рубежом;
3. Проанализировать существующие технологии выделения гелия из состава природного газа;
4. Провести сравнительный анализ методов выделения гелия из состава природного газа, определить преимущества и недостатки каждого метода.

## 1. СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД ВЫДЕЛЕНИЯ ГЕЛИЯ ИЗ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Гелий был открыт сравнительно недавно. Во время наблюдения полного солнечного затмения в 1868 году, английский ученый Джозеф Норман Локиер, наблюдал через спектроскоп интерпретированные в цветных линиях элементы, среди которых выделялась ярко-желтая линия неизвестного на тот момент элемента. Примерно в это же время, французский астроном Пьер Жюль Сезар Жансен наблюдал в спектроскоп похожие ярко-желтые линии. В скором времени было доказано, что в состав хромосферы солнца помимо водорода, азота и других элементов входит также газ, впоследствии названный гелием.[1]

На поверхности Земли гелий был открыт позднее. 23 марта 1895 года, в ходе изучения газов, выделяемых редкоземельными минералами. Гелий, встречающийся в природе, является продуктом радиоактивного распада и процесс накопления его в недрах земной поверхности происходит с очень маленькой скоростью, что дает основание называть гелий не возобновляемым ресурсом.

Основоположниками изучения гелия в России являлись: Иоффе А.Ф., Черепенников А.А., Хлопин В.Г. и другие ученые. В своих работах авторы описывали механизмы выделения гелия из радиоактивных минералов и влияние различных факторов, таких как: температура исследуемого образца и площадь его свободной поверхности, на этот процесс. В процессе исследования гелия была доказана его способность накапливаться в большом количестве в составе нефти и природного газа. В настоящее время в мире нет подтвержденных месторождений чистого гелия, однако его значительные накопленные объемы в составе пластовых углеводородов, позволяют получать гелий в достаточных количествах, способных удовлетворять потребности производства.

Первый опыт промышленного применения гелия заключался в использовании его в качестве газа для наполнения воздушных судов – дирижаблей. В силу своей невосприимчивости к горению, а также высокой

летучести использование этого газа оказалось более безопасным, чем использование взрывоопасного водорода. Академик Владимир Вернадский, наряду с Хлопиным и Черепенниковым стоял у истоков изучения гелия. Он являлся одним из создателей Комиссии по изучению естественных производительных сил России, целью создания которой было нахождение и изучение месторождений природного газа и, в том числе, разработка технологий по выделению из его состава различных компонентов, таких как гелий.

В 1922 году на основе американских и английских научных публикаций была разработана и представлена технология выделения гелия из природного газа. Метод, предложенный заведующим научно-технической частью Военной воздухоплавательной школы РККА, Александром Воробьевым, дал старт масштабным исследованиям в этой области. Позднее возникали ячейки, занимающиеся изучением природных газов с целью обнаружения гелия, создавались новые более совершенные методы производства гелия.

Одним из наиболее перспективных вариантов получения гелия являлась «конверсионно-аммиачная» технология. Предложенная Леонидом Фокиным, она базировалась на использовании уникального химического состава газа Мельниковского месторождения. В результате химической конверсии в составе газа выделялось три объема водорода и один объем азота в процентном соотношении. Это соотношение было необходимо для производства аммиака. Синтез аммиака должен был протекать в специальной колонне, в которой постоянно циркулировали газы. Часть их оставалась не переработанной и могла концентрировать, не вступающий в химические реакции, гелий. Далее можно было подвергнуть газ выморозке, оставляя в остатке чистый гелий. Разработкой технологии также занимался Николай Клюквин, вследствие чего технология получила название – «метод Фокина-Клюквина».

«Конверсионно-аммиачный метод» Фокина–Клюквина, где гелий являлся побочным продуктом и стоял в связи с производством аммиака, имел большой потенциал, и именно на него ориентировались при начале обустройства Мельниковского газового промысла. Однако запасы месторождения были

ограничены 100–125 млн м<sup>3</sup> газа и строительство крупного газохимического комбината оказалось нерентабельным. В этих условиях Александр Бари предложил схему, в которой гелий являлся целевым продуктом. В ее основе лежала частичная конверсия метана для получения водорода, обогащение этим водородом основной массы гелийсодержащей газовой смеси, сжатие и подача в холодильную установку «Linde», а затем отбор сжиженных (метан – азот) и несжиженных (гелий – водород) фракций.[1]

Деятельность организации «Linde» с российской газовой отраслью продолжается и по сей день. Именно эта компания является поставщиком основного технологического оборудования для криогенного разделения газа с получением гелия и других компонентов для нефтехимии на введенном в эксплуатацию Амурском газоперерабатывающем заводе, одном из самых больших в мире предприятий по переработке природного газа.

## 1.1 Гелий: физико-химические свойства, пластовые условия в зонах залегания гелия, анализ геологических условий.

Гелий - второй порядковый элемент периодической системы химических элементов. При нормальных условиях это инертный одноатомный газ без цвета, вкуса и запаха. Гелий является одним из наиболее распространенных элементов во Вселенной, занимая второе место после водорода. Атом гелия состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого по атомным орбиталям движутся два электрона. Оболочка всего одна и оба электрона вращаются на предельно близком к ядру расстоянии, поэтому гелий отличается высокой химической пассивностью. Схема строения атома гелия представлена на рисунке 1:

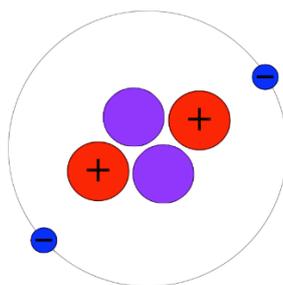
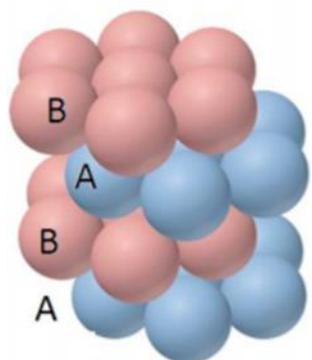
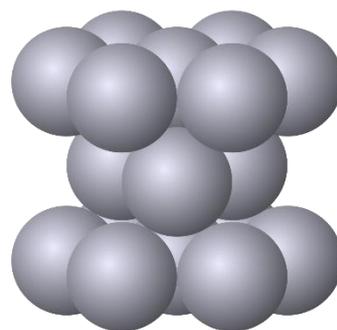


Рисунок 1 – Схема строения атома гелия

Для того чтобы извлечь ядро, необходимо затратить энергию, равную 78,61 эВ. Силы межмолекулярного взаимодействия молекул гелия практически отсутствуют, в связи с чем гелий обладает одной из самых низких температур кипения, наименьшей теплотой испарения.[2] При охлаждении до 2 К гелий остается в жидком состоянии, однако, если при этой температуре приложить давление порядка 25 МПа и более, то образуются кристаллы гексагональной сингонии. Атомы при образовании данного типа кристаллов укладываются в структуру двухслойной гексагональной плотноупакованной кристаллической решетки (Рисунок 2, а). Особенностью данного строения является структура, которую можно представить как две совмещенных гексагональных решетки металла магния (рисунок 2, б).



*а – двухслойная гексагональная  
плотноупакованная решетка в  
кристаллах гелия (А и В уровни)*



*б – структурный тип магния*

Рисунок 2 – Структурные типы кристаллов гелия и магния

Атомы в данной структуре гелия находятся в вершинах гексагональной ячейки и в центре одной из двух тригональных призм, которые получаются при делении ячейки на две части плоскостью, проходящей вдоль малой диагонали основания ячейки – на высоте  $1/2$ .

В силу своих свойств гелий служит наилучшим проводником электричества среди газов и одним из лучших проводников тепла. Гелий обладает высокой теплоемкостью и крайне высокой летучестью. Летучесть гелия обуславливает его широкую распространенность в пространстве в небольших концентрациях. Однако, в недрах Земли чистый гелий в виде залежей не встречается.

Гелий является продуктом радиоактивного распада урана-238, урана-235, тория и нестабильных продуктов их распада. Для заданного количества радиоактивного элемента можно рассчитать скорость излучения альфа-частиц, что позволяет произвести подсчет количества гелия, образующегося таким способом за определенный промежуток времени. И наоборот, «гелиевым методом» можно измерять геологический (абсолютный) возраст пород.[3] Скорость выделения гелия различными радиоактивными элементами приводится в таблице 1.

Таблица 1 – Скорость выделения гелия различными радиоактивными элементами

| Радиоактивное вещество                                | Число альфа-частиц на г/сек | Выделение гелия на мм <sup>3</sup> |
|---|-----------------------------|------------------------------------|
| Уран  | $2,37 \cdot 10^{-4}$        | $2,75 \cdot 10^{-5}$               |
| Уран в равновесии со всеми продуктами своего распада  | $9,7 \cdot 10^3$            | $11,0 \cdot 10^{-5}$               |
| Торий в равновесии со всеми продуктами своего распада | $2,7 \cdot 10^3$            | $3,1 \cdot 10^{-5}$                |
| Радий в равновесии с эманациями, радием А и радием С  | $13,6 \cdot 10^{10}$        | 158                                |

Гелий через поры и трещины породы выходит на дневную поверхность и попадает в атмосферу либо растворяется в пластовых водах. Часть гелия попадает в пласты с благоприятными геологическими условиями, где происходит процесс его накопления. Такими условиями часто обладают пласты залегания нефти и газа. Гелий в пластовых водах, нефти и сжатых газах распределяется согласно константам равновесия. Растворимость гелия в сжатых газах почти на два порядка выше, чем в пластовых водах, а растворимость гелия в нефти занимает промежуточное значение. Растворимость гелия в нефти зависит от её физико-химических свойств, температуры и давления. В парафиновых углеводородах растворимость инертных газов и азота выше, чем в нафтеновых, а в нафтеновых выше, чем в ароматических.[3] Экспериментальные исследования растворимости гелия, аргона и азота в нефти, выполненные А. А. Черепенниковым позволили сделать выводы, что растворимость инертных газов в нефти уменьшается с увеличением удельного веса нефти и ростом температуры. Наиболее растворимым среди изученных газов является аргон, наименее - гелий. В интервалах температур от 15° С до 40° С растворимость инертных газов и азота в нефти при атмосферном давлении значительно превосходит растворимость их в пресной воде. Это свидетельствует о том, что в условиях одной фоновой гелиенасыщенности недр наибольшие концентрации

гелия будут в скоплениях природного газа и нефти, основные запасы которых сосредоточены, как правило, в нефтегазоносных бассейнах.

Хранение и транспортировка гелия, с учетом его особых физико-химических свойств, производится на основе использования специальных емкостей – стальных баллонов различного объема. Баллоны изготавливаются согласно ГОСТ 949-73 Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на  $P(p) \leq 19,6$  МПа (200 кгс/кв. см). Технические условия (с Изменениями N 1-5) на рабочее давление 9,8; 14,7; 19,6 МПа из углеродистой или легированной стали установленного размера и имеют ряд основных параметров представленных в Приложении А.[4] В свою очередь длительное хранение гелия в больших объемах возможно при создании подземных хранилищ ГК или ПГОГ, в различных геологических структурах: соляных кавернах; изолированных залежах истощенных газовых месторождений; блоках (участках, пластах) крупного разрабатываемого месторождения путем закачки ГК или ПГОГ в разрабатываемый блок.

В связи с большой проникающей способностью гелия, отмеченной ранее, к герметичности покрышек предъявляются высокие требования. Большую роль играет толщина и состав флюидоупоров. Перспективными подземными хранилищами являются пласты с галогенно-карбонатными и карбонатно-галогенными экранирующими горизонтами. Каменная соль является слабопроницаемой породой для гелия. Об этом свидетельствуют ее свойства, такие как пластичность, высокая плотность, низкая гидравлическая проводимость, очень малая пористость, а также низкий коэффициент диффузии гелия. Глинистые флюидоупоры эффективны для более тяжелых, например, углеводородных соединений, и не всегда могут служить надежными гелиевыми флюидоупорами из-за низкой пластичности, в большинстве случаев, и множества субвертикальных тектонических и интрузивных нарушений.[5]

По содержанию гелия в природном газе, месторождения подразделяются на богатые (объемная доля более 0,5%), рядовые (объемная доля от 0,1% до 0,5%) и бедные (объемная доля менее 0,1%). В рассматриваемой работе акцент

делается на месторождениях углеводородов Восточной Сибири. Данный регион является богатейшим в России и мире по содержанию гелия в природном газе.[6] Здесь существует 31 гелийсодержащее месторождение. Часть из них с крупнейшими ( $> 200$  млн  $\text{м}^3$ ) и даже уникальными ( $> 2$  млрд  $\text{м}^3$ ) запасами гелия (кат. А + В + С<sub>1</sub> + С<sub>2</sub>) с содержанием гелия 0,11–0,67 % (Рисунок 3).

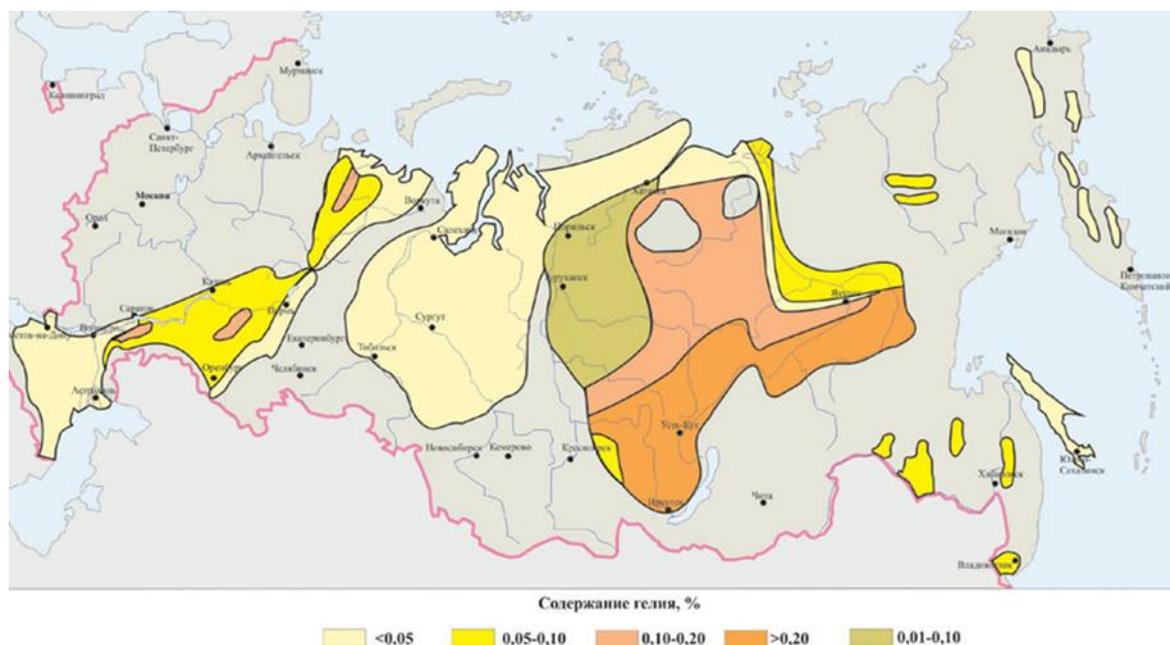


Рисунок 3 – Карта распределения гелия в недрах на территории Российской Федерации

В свою очередь осадочный чехол в нефтегазоносных областях Восточно-Сибирского региона представлен терригенно-карбонатными средне-верхне-рифейскими, вендскими, а также терригенно-карбонатно-соленосными кембрийскими породами. Также присутствуют карбонатно-терригенные ордовикские, терригенные силурийские, карбонатно-терригенные, местами галогенные девонские, терригенные (с прослоями углей) каменноугольно-пермские, туфогенные и туфогенно-осадочные триасовые, терригенные (с прослоями углей) юрские отложения и породы четвертичного возраста. Основными стратиграфическими подразделениями указанных систем являются местные свиты, часто имеющие разные наименования, но коррелируемые между собой соответственно возрасту. Промышленная нефтегазоносность на

Сибирской платформе связана с отложениями рифей-венд-кембрийского комплекса.

Вендская система представлена двумя отделами – нижним и верхним, породы которых характеризуются значительными фациальными вариациями как по площади, так и по разрезу. Нижний венд включает ряд свит, приуроченных к различным структурно-фациальным зонам. Они слагаются в основном терригенными отложениями: конгломератами, песчаниками, алевролитами, аргиллитами и известняками. Мощность свит изменяется от 0 до 1300 м. Верхний венд повсеместно распространен на юге Сибирской платформы в полном или частичном объеме в составе свит, распространенных в разных структурно-фациальных зонах. Нижняя часть верхневендских отложений сложена преимущественно терригенными образованиями: разнозернистыми песчаниками, конгломератами, алевролитами и аргиллитами. Выше залегают доломиты, ангидритодоломиты, мергели с прослоями аргиллитов, алевролитов, реже песчаников. Мощность отдела колеблется от 165 до 870 м.

Кембрийская система представлена нижним и средним отделами. Нижний кембрий слагается свитами и сериями, отличающимися значительной литолого-фациальной изменчивостью: усольской, бельской, булайской, ангарской, литвинцевской (нижняя часть) и их аналогами. Средний кембрий включает верхнюю часть литвинцевской серии, верхоленскую свиту и их аналоги. Разрез кембрия представляет собой циклическое переслаивание каменной соли, карбонатных пород с прослоями ангидритов и ангидритодоломитов с включениями глин. Мощность системы колеблется в широких пределах от 1500 до 3000 м.[3]

Основными гелийсодержащими месторождениями Восточной Сибири являются: в Красноярском крае – Юрубчено-Тохомское, Собинское; в Иркутской области – Ковыктинское, Дулисьминское; в Республике Саха (Якутия) – Чаяндинское, Среднеботуобинское, Тас-Юряхское, Верхневилучанское (Рисунок 4).

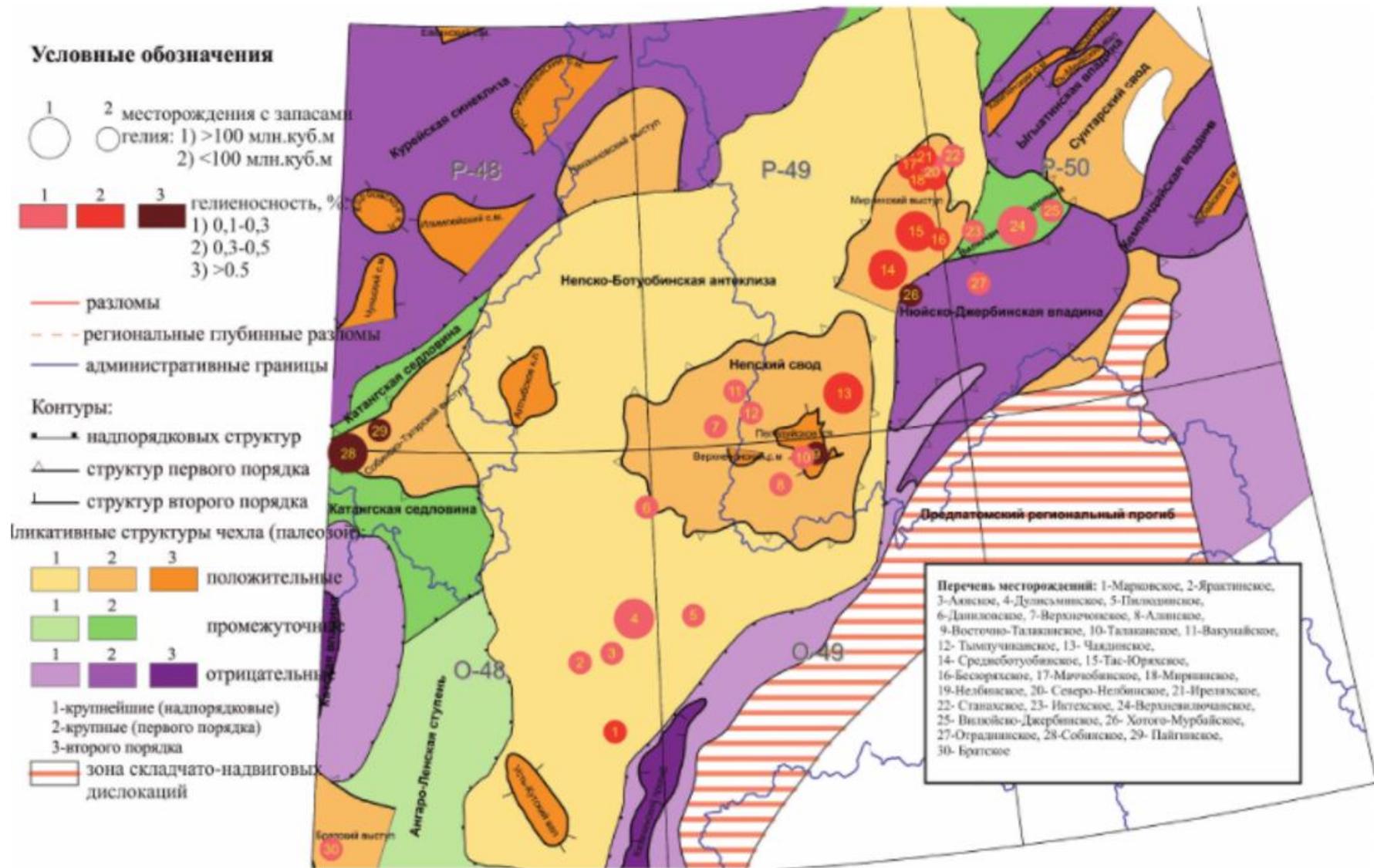


Рисунок 4 – Схема расположения месторождений, содержащих гелий, на юге Восточной Сибири

При разработке газовых и газоконденсатных месторождений необходимо учитывать изменение физико-химических свойств природного газа конкретного месторождения. Так, например, при больших давлениях (больше 10 – 15 МПа) газы перестают удовлетворять условиям идеального газа, так как средние расстояния между молекулами становятся сравнимыми с радиусом межмолекулярного взаимодействия, и природа вязкости газов становится аналогичной жидкости, где расстояние между молекулами много меньше, чем в газах, а вязкость обусловлена молекулярным взаимодействием, ограничивающим подвижность молекул.

Залежи природного газа в зависимости от условий залегания способны вмещать в себя значительное количество гелия.

Природный газ месторождений имеет многокомпонентный состав, в котором концентрация того или иного элемента определяет дальнейшее направление переработки этого газа. ГОСТ Р 56676-2015 «Проектирование разработки и освоение газовых и газоконденсатных месторождений. Подсчет запасов газа и газового конденсата объемным методом. Основные технические требования» устанавливает не только метод подсчета геологических запасов этана, пропана, бутанов, сероводорода, углекислого газа, гелия и других попутных компонентов, но и минимальные рекомендуемые промышленные концентрации этих компонентов (Таблица 2).[7]

Таблица 2 - Минимальные промышленные концентрации попутных компонентов

| <b>Основное или попутное полезное ископаемое</b> | <b>Попутный компонент</b> | <b>Промышленная концентрация</b> |
|--|---------------------------|----------------------------------|
| Свободный газ и газ газовых шапок                | Этан                      | 3%                               |
|  | Пропан-бутан              | 0,9%                             |
|  | Сероводород               | 0,5%                             |
|  | Гелий                     | 0,005%                           |
|  | Азот                      | 15%                              |
|  | Двуокись углерода         | 15%                              |

Данный нормативный акт устанавливает систему подсчета геологических запасов компонентов природного газа, включая гелий, которая строится на основе использования формулы:

$$Q_{\text{комп.0}} = Q_{\text{Г0}} \cdot P_{\text{комп}}, \quad (1)$$

Где:

$Q_{\text{комп.0}}$  – геологические запасы гелия или других попутных компонентов, тыс. т;

$Q_{\text{Г0}}$  – геологические запасы свободного газа, млн м<sup>3</sup>;

$P_{\text{комп}}$  – потенциальное содержание компонента, г/м<sup>3</sup>.

В свою очередь потенциальное содержание гелия в пластовом газе определяется с точностью до трех знаков по формуле:

$$P_{\text{комп}} = \frac{I_{\text{комп}} \sigma_{\text{комп}}}{100}, \quad (2)$$

Где:

$I_{\text{комп}}$  – процентное мольное содержание компонента (гелия) в пластовом газе, %

$\sigma_{\text{комп}}$  – плотность компонента (гелия) при давлении 0,1 Мпа и температуре 20°С, г/м<sup>3</sup>

На основании ГОСТ Р 56676-2015 «Проектирование разработки и освоение газовых и газоконденсатных месторождений. Подсчет запасов газа и газового конденсата объемным методом. Основные технические требования» можно утверждать, что минимальная концентрация гелия (процентное мольное содержание) в пластовом газе, необходимая для промышленного производства этого газа составляет 0,005% от общего состава природного газа.

После того как природный газ проходит стадии очистки он должен отвечать ряду требований с точки зрения компонентного состава. Согласно ГОСТ Р 57413-2017 «Газ горючий природный. Государственные стандартные образцы на основе магистрального газа. Технические условия», в перечень определяемых компонентов с указанием молярной доли их в ГСО – ПГМ, а также расширенной неопределенности результатов измерений молярной доли при

коэффициенте охвата воздействием  $k=2$  среди прочих элементов входит гелий (таблица 3).[8]

Таблица 3 - Метрологические характеристики ГСО-ПГМ (содержание гелия)

| Определяемые компоненты в ГСО-ПГМ | Интервал аттестованных значений молярной доли компонентов, % | Расширенная неопределенность $U(x_i)$ , %, при коэффициенте охвата $k=2$ |
|-----------------------------------|--|--|
| Гелий (He)                        | От 0,0010 до 0,5 включ.                                      | $0,03x+0,00008$  |

В свою очередь коэффициент охвата пласта воздействием определяется как отношение объема продуктивного пласта, охваченного вытеснением, к начальному нефтенасыщенному объему пласта:

$$K_{\text{охв}} = \frac{V_{\text{пв}}}{V_{\text{п}}}, \quad (3)$$

Где:

$V_{\text{пв}}$  – объем залежи, охваченный процессом вытеснения,

$V_{\text{п}}$  – начальный нефтесодержащий объем залежи.

Данный коэффициент зависит от плотности сетки эксплуатационных скважин.

## 1.2 Опыт промышленного применения гелия в России и за рубежом

К началу двадцатого века производство гелия обосновывалось в основном перспективами применения его в качестве газа-наполнителя для воздухоплавательных судов. Однако, уже к концу века был совершен огромный скачок в развитии технологий и гелий стал незаменим в высокотехнологичных областях промышленности, научных исследованиях и других важных сферах народного хозяйства, таких как:

- сварка и производство чистых и сверхчистых материалов, микросхем и стекловолоконных кабелей (в качестве защитного газа);
- получение сверхнизких температур (в качестве хладагента);
- в хроматографии (в качестве газа-носителя);
- для поиска утечек в трубопроводах и котлах;
- в гелий-неоновых лазерах (как компонент рабочего тела);

- для метеорологических зондов
- в ядерной и термоядерной энергетике и других областях, в которых используется явление сверхпроводимости;
- большую роль гелий играет в сфере скоростного железнодорожного сообщения, обеспечивая работу сверхпроводящих магнитов
- при создании дыхательных смесей;
- разработки в области создания безопасных атомных реакторов основаны на применении гелия в качестве теплоносителей

По разработкам зарубежных специалистов на основе гелиевых охладителей возможно создание ядерных реакторов в виде системы керамических блоков с гелиевыми теплоносителями, погруженными в землю. Их масса меньше критической и из-за разобщенности блоков не способна к соединению до критической и спонтанному делению. Гелий для них охладитель с высокой теплопроводностью и устойчивостью к радиации. Создание модульных ядерных реакторов в керамических оболочках с гелиевым охладителем, размещенных под землей, способно исключить возможность возникновения аварийных ситуаций, приводящих к катастрофическим последствиям.[9]

Наглядно объемы применения гелия в различных сферах представлены на рисунке 5:



Рисунок 5 – Диаграмма потребления гелия в различных секторах хозяйства

Из представленной диаграммы видно, что на сегодняшний день наибольший интерес к применению гелия проявляется в сфере медицины. Это связано прежде всего с обеспечением работы магнитных томографов и иной медицинской техники.

Согласно ИТС 50-2017 «Переработка природного и попутного газа» мировые запасы гелия оцениваются в 56-60 млрд м<sup>3</sup>, из которых более 90% приходится на 4 страны: Катар, США, Алжир и Россию (с учетом запасов в составе гелийсодержащих газов Восточной Сибири и Дальнего Востока). В настоящее время в РФ производителями гелия являются два предприятия. Гелиевый завод ООО «Газпром добыча Оренбург» выпускает около 4,5 млн м<sup>3</sup>/год (около 2,5% мирового производства) товарного гелия. Здесь в качестве сырья используется газ Оренбургского НГКМ, в составе которого содержание гелия составляет порядка 0,055%. Также в июне 2021 года начала работу первая линия Амурского ГПЗ, которая включает в себя установку для тонкой очистки гелия мощностью 20 млн м<sup>3</sup>/год. Ресурсной базой для проекта Амурского ГПЗ являются Чаяндынское месторождение (запасы 1,24 трлн м<sup>3</sup> газа) в Якутии и Ковыктинское (2 трлн м<sup>3</sup> газа) в Иркутской области. ГПЗ перерабатывает

многокомпонентный природный газ, выделяя из него метан, этан, пропан, бутан и гелий.

### **1.3 Анализ степени изученности методов выделения гелиевого концентрата в России и за рубежом**

Производство гелия в мире происходит в основном с применением технологии криогенного выделения гелия из состава природного газа, которая основывается на критически малой температуре перехода гелия из газообразного состояния в жидкое - гелиевый концентрат. Согласно ГОСТ Р 53521-2009 «Переработка природного газа. Термины и определения» гелиевый концентрат – это газовая смесь, содержащая не менее 80 % объема гелия и не более 20 % объема азота, получаемая из гелийсодержащего природного газа, представляющая собой сырье для производства сжатого газообразного гелия.[10]

С применением технологии криогенного выделения гелия из состава природного газа в России работает завод по производству гелия ООО «Газпром добыча Оренбург». Это одна из составных частей крупного газоперерабатывающего комплекса, созданного на базе уникального нефтегазоконденсатного месторождения, содержащего гелий.[9]

Технология криогенного выделения гелия из состава природного газа реализуется на базе Оренбургского гелиевого завода в два этапа. На начальном этапе природный газ, содержащий различные примеси, включая гелий, проходит первичную очистку в сепараторах, колоннах для выделения фракций из состава многокомпонентного газа. Затем газ попадает в специальные устройства - турбодетандеры, в которых он расширяется и, под действием совершаемой работы, охлаждается. Продуктами, получаемыми в ходе первого этапа переработки, являются: гелиевый концентрат, жидкие углеводороды, концентрат азота, а также сухой газ (метан – азотная смесь). После этого гелиевый концентрат поступает в блок тонкой очистки, где происходит обогащение смеси

гелием и получение гелия высокой чистоты, соответствующего качества, установленного нормативными актами.

Зарубежный опыт производства гелия обусловлен высокой степенью развития технологий в ряде стран и, как следствие, растущим спросом на это ценное сырье. Однако технологии производства в основном базируются на применении того же криогенного метода.

У данной технологии есть недостатки, основным из которых является высокая энергозатратность производства и, следовательно, высокая цена конечного продукта. Реализация криогенного метода целесообразна, когда производство гелия является побочным процессом для основного процесса получения сжиженного природного газа. Среди преимуществ криогенного метода можно выделить, что получаемый продукт - гелий высокой чистоты. Согласно ТУ 0271-135-31323949-2005 «Гелий газообразный (сжатый)» газообразный гелий, производимый на гелиевом заводе ООО «Газпром добыча Оренбург» должен соответствовать требованиям по объемной доле газа в смеси для марки А гелия, не менее 99,9950%, а для марки Б, не менее 99,9900%. [11]

Помимо низкотемпературных методов разделения природного газа на компоненты с выделением гелия из его состава разрабатываются инновационные технологии, на основе которых возможно получать продукты, имеющие большой потенциал на мировом топливном рынке. Одной из таких технологий является газогидратное обогащение природного газа гелием. В основе этой технологии заложен процесс перехода природного газа из газообразного состояния в твердое с участием в реакции установленного количества воды при определенных термобарических условиях. В отличие от метана, этана, углекислого газа и азота гелий не образует с водой гидратов при низких температурах и высоких давлениях. В дальнейшем, полученный гелиевый концентрат может направляться на долгосрочное хранение [12].

К данной технологии проявляется интерес поскольку газовые гидраты являются более энергоемким видом топлива в сравнении с природным газом (170

объёмов газа на один объём газогидрата). Изучению данного метода также способствует, открытый сравнительно недавно, эффект самоконсервации газовых гидратов, согласно которому на начальной стадии разложения гидратов метана и других газов при температурах ниже  $-2^{\circ}\text{C}$  и при снижении давления газа-гидратообразователя ниже давления 3-фазного равновесия системы «газ — лед — гидрат» газогидрат покрывается слоем льда на поверхности, который резко замедляет последующее его разложение.[13] Таким образом, возможно длительное хранение образцов газового гидрата в метастабильном термодинамическом состоянии.

Однако гидратообразование – это энергозатратный и ресурсоемкий метод, так как в зависимости от концентрации гелия в исходном сырье воды требуется в соотношении от 20:1 до 100:1. Также усложняется процесс последующей глубокой осушки гелиевого концентрата. Данная технология находится на стадии исследования в России и в настоящий момент не применяется в рамках производства.

В свою очередь эффективное освоение гелиенасыщенных месторождений, которые представлены в России на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока, во многом определяется идеологией формирования подходов к решению проблем извлечения гелия из состава природных газов данного региона и долгосрочного хранения тех его объемов, которые не будут востребованы рынком. Выделение гелия из состава гелийсодержащих газов Восточной Сибири и Дальнего Востока наиболее коммерчески оправдано с использованием мембранной технологии, в которой для разделения природного газа используются специальные полимерные мембраны, входящие в состав мембранного модуля. Попадающий в мембранный модуль газ подвергается разделению за счет различной скорости проникновения его компонентов через полимерную мембрану. Для более полного разделения природного газа часто используются установки с повторной переработкой низконапорного пермеата.

Для реализации такого проекта не требуется получение ГК, состоящего только из гелия и азота, а вполне допустимым является наличие в нем примесей углеводородов, в том числе метана, и не углеводородных компонентов, присутствующих в добываемом природном газе, с учетом закачки ГК обратно в пласт.

Создание такого рода гибких систем подготовки газа на промыслах и дальнейшей переработки на ГПЗ позволяет в сравнении с другими технологиями экономически более эффективно использовать добываемое сырье в производстве товарного гелия и легких углеводородов для нефтехимических производств.

## **2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫДЕЛЕНИЯ ГЕЛИЯ ИЗ СОСТАВА ПРИРОДНОГО ГАЗА**

### **2.1 Криогенный метод разделения природного газа**

Развитие технологий разделения природного газа и выделения из его состава гелия позволяет в настоящее время получать различные компоненты высокой степени чистоты. Работающий на базе Оренбургского газоперерабатывающего комплекса гелиевый завод производит товарный гелий путем криогенного разделения природного газа с образованием СПГ. Объем гелия в составе природного газа, используемого в качестве сырья на Оренбургском гелиевом заводе, составляет до 0,055%. Использование природного газа с содержанием гелия менее 0,1% считается коммерчески невыгодным, однако, движущей силой в реализации проекта строительства гелиевого завода являлся газовый потенциал Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения. В силу того, что гелий в криогенной схеме разделения является побочным продуктом, а основным продуктом, получаемым в ходе применения данной технологии, является СПГ, инвестиции в развитие криогенного метода в данном регионе коммерчески оправданы.

В настоящее время Оренбургский гелиевый завод состоит из трёх очередей, на которых действуют пять гелиевых блоков, введённых в эксплуатацию в период с 1979 по 1989 годы. С начала работы гелиевого завода максимальный объем выработки товарного гелия составил 9,2 млн м<sup>3</sup> в год.

Получение гелия на заводе сопряжено с большим количеством производственных процессов, характеризующихся широким диапазоном технологических параметров. Колебания температур происходят от -203 °С до +430 °С, а давления – от глубокого вакуума до 400 атм. Такие экстремальные изменения термобарических условий требуют применения соответствующих материалов и оборудования.[9]

Процесс выделения газообразного гелия из состава природного газа на заводе осуществляется в две стадии. На первой стадии происходит выделение

гелиевого концентрата с содержанием гелия не менее 80%. Проходя на второй стадии блок тонкой очистки из гелиевого концентрата получается гелий высокой чистоты, удовлетворяющий требованиям ТУ 0271-135-31323949-2005 «Гелий газообразный (сжатый)» (Таблица 4):

Таблица 4 - Физико-химические показатели гелия газообразного (сжатого) по ТУ 0271-135-31323949-2005

| Показатель  | Гелий газообразный |           |
|---|--------------------|-----------|
|   | Марка «А»          | Марка «Б» |
| Объемная доля гелия [He], не менее                  | 99,9950%           | 99,9900%  |
| Объемная доля водорода [H <sub>2</sub> ], не более  | 0,0001%            | 0,0025%   |
| Объемная доля азота [N <sub>2</sub> ], не более     | 0,0005%            | 0,0020%   |
| Объемная доля O <sub>2</sub> + Ar, не более         | 0,0001%            | -         |
| Объемная доля кислорода [O <sub>2</sub> ], не более | -                  | 0,0005%   |
| Объемная доля аргона [Ar], не более                 | -                  | 0,0001%   |
| Объемная доля CO <sub>2</sub> + CO, не более        | 0,0002%            | 0,0010%   |
| Объемная доля углеводородов, не более               | 0,0001%            | 0,0005%   |
| Объемная доля [Ne], не более                        | 0,0040%            | 0,0090%   |
| Объемная доля водяных паров, не более               | 0,0005%            | 0,0020%   |

Сырьем для переработки на гелиевом заводе служит природный газ Оренбургского газоперерабатывающего завода, очищенный от сероводорода и диоксида углерода и осушенный до температуры точки росы минус 10°C, который подается по технологическим трубопроводам на 1 и 2 очереди гелиевого завода.

На рисунке 5 представлена принципиальная схема получения гелиевого концентрата:

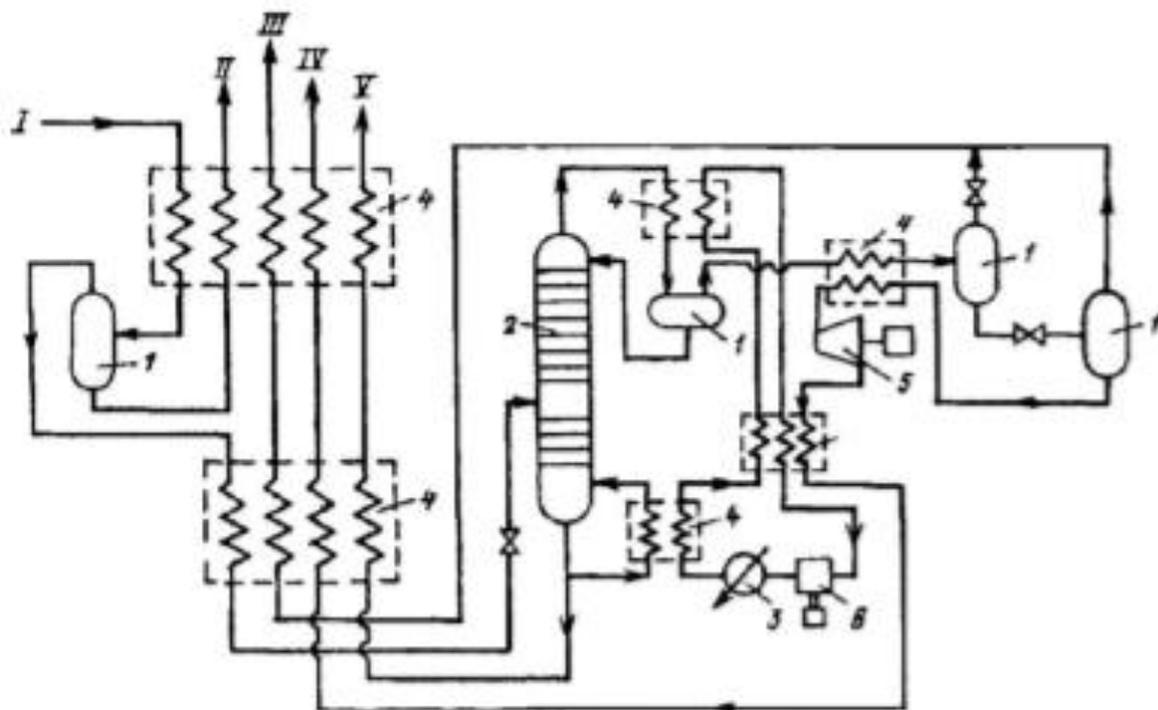


Рисунок 5 – Принципиальная схема получения гелиевого концентрата:

1 – сепараторы; 2 – колонны; 3 – холодильник; 4 – рекуперативные теплообменники; 5 – турбодетандер; 6 – компрессор.

Потоки: I – природный газ; II – жидкие углеводороды; III – гелиевый концентрат; IV – концентрат азота; V – сухой газ (метан – азотная смесь)

Перед криогенным разделением газ очищается от меркаптанов и повторно осушается до точки росы минус  $70^{\circ}\text{C}$  на адсорбционных установках.

Очищенный и осушенный газ под давлением 3,2 МПа охлаждается вначале пропаном, затем в двух рекуперативных теплообменниках (с промежуточной сепарацией) до  $-104^{\circ}\text{C}$  и после дросселирования с температурой  $-153^{\circ}\text{C}$  подается в колонну. Снизу этой колонны отводится в основном метан. Верх колонны охлаждается за счет рекуперации холода, поэтому там поддерживается температура  $-191^{\circ}\text{C}$ , при которой сверху отводится смесь гелия и азота. Эта смесь затем повторно охлаждается в двух рекуперативных теплообменниках и в двух сепараторах разделяется на концентрат гелия (85%) и концентрат азота (99,5%). Последний, расширяясь в турбодетандоре 5, охлаждает верх колонны и отводится как продукт.[9]

После первого этапа очистки природного газа гелиевый концентрат подается на подземное хранение или поступает в блок тонкой очистки гелия для получения товарного газообразного гелия. Технологически схема тонкой очистки реализована на основе следующих процессов (Рисунок 6):

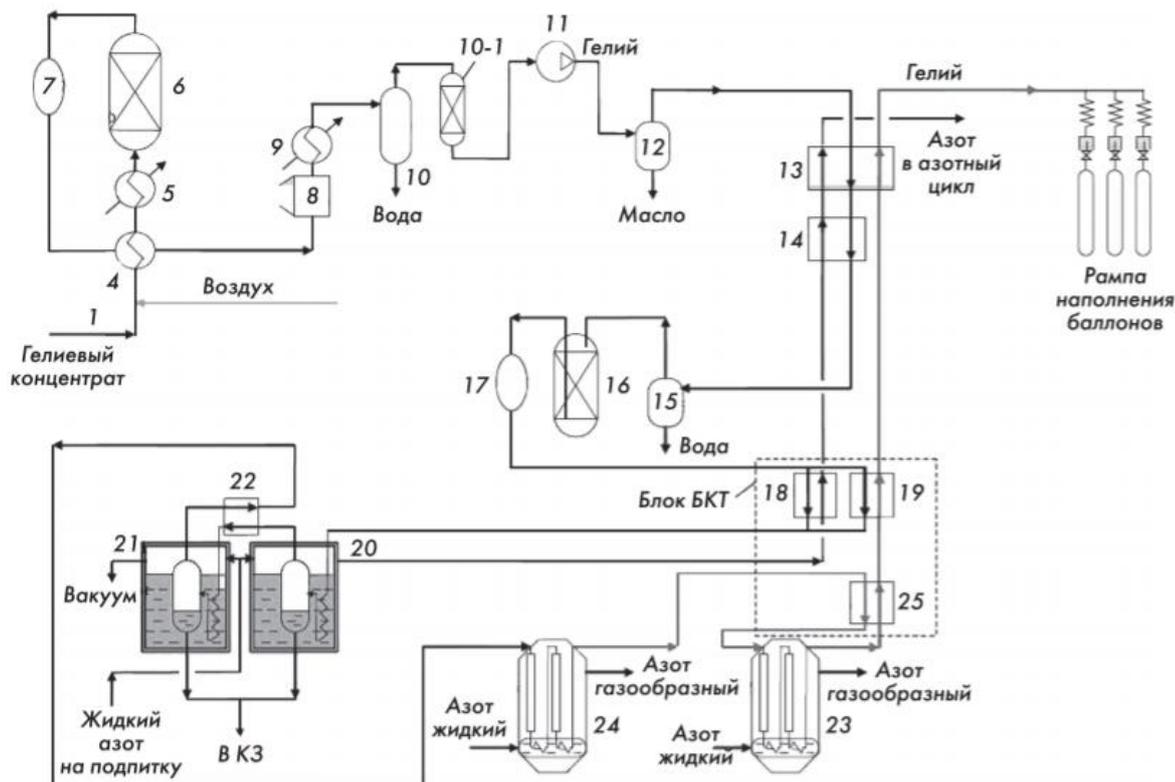


Рисунок 6 – Принципиальная схема тонкой очистки гелиевого концентрата на Оренбургском гелиевом заводе

В блоке тонкой очистки происходит ряд процессов, направленных на получение товарного гелия и других ценных компонентов:

- очистка гелиевого концентрата от примесей водорода, путём окисления последнего кислородом на алюмоплатиновом катализаторе с образованием воды, которая затем удаляется из газового потока путём конденсации и адсорбции;
- конденсационная осушка гелия для первичного удаления соответствующих примесей. Она осуществляется для каждой примеси на соответствующем температурном уровне;
- адсорбционная осушка гелия;
- конденсационная очистка гелия от примесей азота;

– адсорбционная очистка гелия от азота, неона, остатков водорода.

Очистка гелия от микропримесей методом адсорбции осуществляется на активированном угле при криогенных температурах либо при его ожигении. Адсорберы обладают способностью изменения собственной поглотительной способности в зависимости от внешних условий – с понижением температуры и с повышением давления поглотительная способность растёт, а с повышением температуры и с уменьшением давления – падает. Это позволяет организовать непрерывный технологический процесс очистки от примесей, используя переключающиеся аппараты, работающие либо в режиме адсорбции, либо – регенерации. Кроме того, поглотительная способность сорбентов для конкретных примесей максимальна при температуре, близкой к температуре конденсации данной примеси, что позволяет технологически организовать процесс оптимального поглощения конкретных примесей.

Стоит отметить, что использование адсорбционных методов для выделения гелия из природного газа как самостоятельную технологию крайне затруднительно в связи с высокой химической инертностью гелия, поэтому при их реализации требуется обеспечить адсорбцию всего объема метана и других компонентов природного газа, что в свою очередь приведет к значительным габаритам используемого оборудования и, как следствие, крайне высоким капитальным вложениям в создание установки.

Эффективность применения криогенных методов компонентного разделения природных газов, несмотря на высокие энергетические затраты, обуславливается тем, что это дает возможность на различных стадиях попутно получать ценные товарные продукты – этан, метановую фракцию и ШФЛУ.

## **2.2 Технология мембранного разделения природного газа на компоненты**

В цепочке процесса криогенного разделения природного газа на компоненты выделение гелия занимает важную роль. Однако применение данной технологии связано с большими энергозатратами и преимущественно не

направленно на получение товарного гелия, а коммерчески оправдано лишь в случае необходимости получения СПГ. Для решения проблемы компонентного разделения природного газа с выделением гелия из его состава разрабатываются и активно внедряются технологии мембранного выделения гелиевого концентрата.

Применяемые единичные мембранные устройства представляют собой один или несколько мембранных модулей, соединенных параллельным или последовательным способом, но имеющих один общий выход очищенной газовой смеси и один общий выход газовой смеси с извлеченными компонентами.

Принцип мембранного разделения газовой смеси основан на различной скорости проникновения ее компонентов через специальную полимерную мембрану за счет перепада парциальных давлений газа по обе стороны мембраны. Газы, быстро проникающие через полимерную мембрану (например  $H_2$ ,  $He$ ,  $CO_2$  и т.д.), поступают внутрь волокон и выходят из мембранного картриджа через один из выходных патрубков. Газы, с низкой скоростью проникновения, проходя через мембрану (например,  $CO$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ), выходят из мембранного модуля через второй выходной патрубок.[14]

Схематично мембранный модуль со схемой разделения потоков газа в нем показаны на рисунке 7.

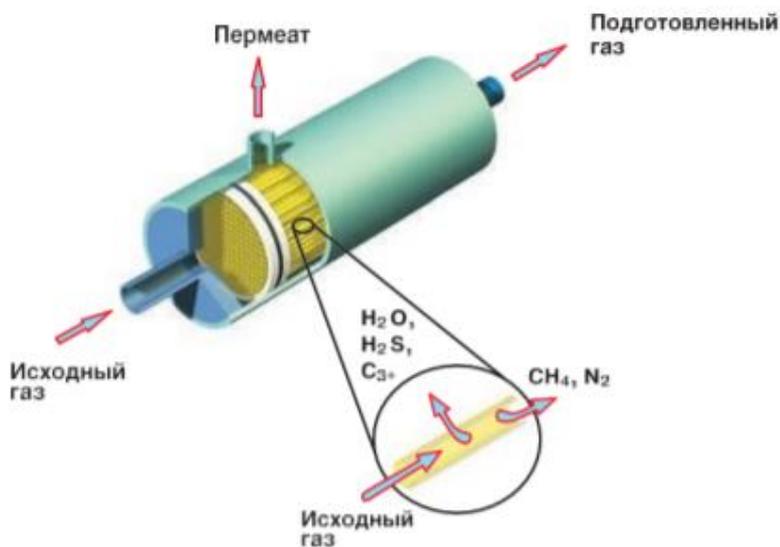


Рисунок 7 – Схема распределения потоков в мембранном модуле

Технические решения, компоновки мембранных установок широко известны и имеют множество вариантов исполнения: многокаскадные, многоступенчатые, гибридные и другие.

Примером каскадного выполнения установки с разделением на несколько секций может служить классическая рециркуляционная схема двухкаскадного мембранного устройства последовательного типа, в которой исходный низконапорный поток газовой смеси после головного компрессора подается в первую секцию на вход первого мембранного устройства. Остаточный, не проникший через мембрану поток – ретентат первой секции, подается во вторую секцию на вход второго мембранного устройства, а проникший через мембрану поток – пермеат первой секции, выводится в качестве отбора извлеченных газовых компонент. Низконапорный пермеат второй секции возвращается на всасывающее устройство головного компрессора после чего вместе с исходным газом поступает на первую секцию, и после повторного прохождения технологических ступеней этот остаточный поток также является отбором очищенной газовой смеси.

Подобное решение в одну ступень с последовательным расположением двух мембранных устройств с рециклом пермеата второй секции, применяется в основном для извлечения среднепроникающих через мембрану целевых компонентов, например, для извлечения  $\text{CO}_2$  из состава природного газа.

Для более эффективного извлечения целевых газовых компонентов из природного газа (особенно легкопроникающих, таких как гелий), предпочтительным вариантом использования являются, как минимум двухступенчатые мембранные установки.

В базе данных Федеральной службы по интеллектуальной собственности «Роспатент» зарегистрирован патент на полезную модель – RU №109989 от 10.11.2011 – «Установка для осушки природного газа». Это двухступенчатая мембранная установка, технологической особенностью которой является то, что

разделение газовых смесей происходит с помощью полупроницаемых мембран.[15] На рисунке 8 представлена схема данной установки.

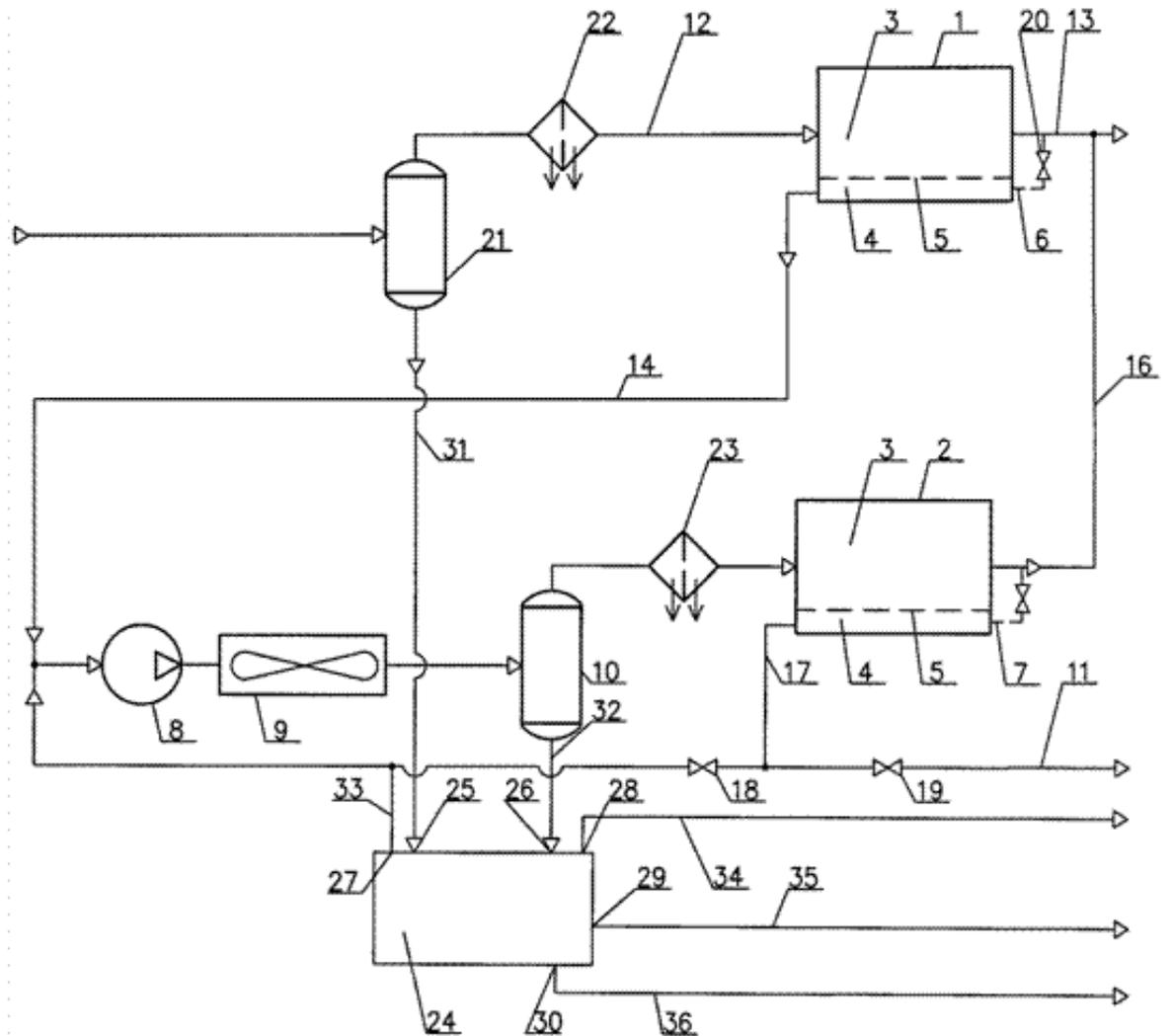


Рисунок 8 – Схема двухступенчатой мембранной установки для осушки природного газа

Установка для осушки природного газа содержит:

- 1,2 – мембранные модули;
- 3,4 – полости высокого и низкого давления;
- 5 – полупроницаемая Мембрана;
- 6,7 – каналы продувки полостей низкого давления;
- 8 – компрессор;
- 9 – холодильник;
- 10 – сепаратор;
- 11 – трубопровод сброса;

- 12 – подводящий трубопровод;
- 13 – выходной трубопровод;
- 14 – первый трубопровод отвода проникшего газового потока;
- 15 – напорный трубопровод;
- 16 – трубопровод отвода не проникшего газового потока;
- 17 – второй трубопровод отвода проникшего газового потока;
- 18, 19 – запорно-регулирующие устройства;
- 20 – дросселирующий элемент (выполненный, например, в виде дюзы);
- 21 – дополнительный сепаратор;
- 22, 23 – фильтры;
- 24 – блок стабилизации конденсата;
- 25, 26 – вход в блок стабилизации конденсата;
- 27,28, 29, 30 – выход из блока стабилизации конденсата;
- 31,32 – трубопроводы отвода конденсата из сепараторов 21 и 10;
- 33 – трубопровод подачи потока газа стабилизации;
- 34 – трубопровод отвода потока газовой смеси на утилизацию;
- 35 – трубопровод отвода стабильного углеводородного конденсата на дальнейшую переработку либо для закачивания в нефть;
- 36 – трубопровод отвода водного конденсата для закачки его в пласт с целью поддержания пластового давления либо на утилизацию.

Установка может быть снабжена дополнительными мембранными модулями, которых нет на технологической схеме, при этом к каждому из мембранных модулей 1 и 2 параллельно подключен по крайней мере один дополнительный мембранный модуль с образованием мембранного газоразделительного блока.

В каждом мембранном модуле 1 и 2 мембрана может быть выполнена в виде полупроницаемых полых волокон.

Установка работает следующим образом:

Сырьевой природный газ по подводящему трубопроводу 12 подается в полость 3 высокого давления первого мембранного модуля 1. Для предварительного осушения и очистки от механических примесей природного газа могут быть использованы установленные в подводящем трубопроводе 12 сепаратор 21 и фильтр 22. В первом мембранном модуле 1 на мембране 5 происходит разделение, природного газа, на два потока, а именно, на газовый поток, проникший через мембрану 5, и на непроникший газовый поток, при этом непроникший газовый поток практически не содержит влаги. Из полости 3 высокого давления первого мембранного модуля 1 непроникший через мембрану 5 газовый поток поступает в выходной трубопровод 13, по которому он направляется к потребителю. Из полости 4 низкого давления первого мембранного модуля 1 газовый поток с большим содержанием влаги подается по первому трубопроводу 14 отвода проникшего газового потока на вход компрессора 8, при этом полость 4 продувается путем непрерывной подачи по каналу 6 части непроникшего в первом мембранном модуле 1 газового потока. С выхода компрессора 8 газовый поток по напорному трубопроводу 15 направляется в холодильник 9 и далее в сепаратор 10, где происходит отделение влаги от газового потока. Далее газовый поток через фильтр 23 поступает в полость 3 высокого давления второго мембранного модуля 2. Из полости 3 высокого давления второго мембранного модуля 2 не проникший через мембрану 5 газовый поток направляется по трубопроводу 16 отвода в выходной трубопровод 13. Из полости 4 низкого давления второго мембранного модуля 2 газовый поток с большим содержанием влаги подается по второму трубопроводу 17 через открытое запорно-регулирующее устройство 18 в первый трубопровод 14 отвода проникшего газового потока, при этом запорно-регулирующее устройство 19, установленное в трубопроводе 11 сброса, закрыто. В случае снижения качества осушаемого природного газа из-за переизбытка влаги в газовом потоке, проникшем во втором мембранном модуле 2, периодически осуществляют его сброс по трубопроводу 11, при этом на короткое время

закрывают запорно-регулирующее устройство 18 и открывают запорно-регулирующее устройство 19. В результате этого происходит снижение содержания влаги в проникшем в мембранном модуле 2 газовом потоке. Продувка полости 4 низкого давления второго мембранного модуля 2 осуществляется путем подачи по каналу 7 части не проникшего во втором мембранном модуле 2 газового потока. Дросселирующие элементы 20, например, дюзы, установленные в каналах 6 и 7, обеспечивают необходимый расход газового потока, идущего на продувку.

При наличии в установке блока 24 стабилизации конденсата на его входы 25 и 26 по трубопроводам 31 и 32 поступает конденсат из сепараторов 21 и 10. С выхода 27 по трубопроводу 33 во второй трубопровод 17 отвода проникшего газового потока поступает поток газа стабилизации. С выхода 28 по трубопроводу 34 осуществляют отвод потока газовой смеси на утилизацию. По трубопроводу 35, подключенному к третьему выходу 29, осуществляют отвод стабильного углеводородного конденсата на дальнейшую переработку либо для закачивания в нефть, а по трубопроводу 36, подключенному к четвертому выходу 30, производят отвод водного конденсата из блока 24 стабилизации конденсата для закачки его в пласт с целью поддержания пластового давления либо на утилизацию.

Продувка полости 4 низкого давления мембранного модуля 1 продуктовым осушенным газовым потоком, не проникшим в модуле 1, и обеспечение возможности периодического сброса некондиционного газового потока из низко напорного второго трубопровода 17 отвода проникшего газового потока позволили направить осушенный во втором мембранном модуле 2 газовый поток также в выходной трубопровод для потребителя, что привело к повышению эффективности осушки газа в установке. Кроме того, это дало возможность вести осушку смеси газов не только от воды, но и от тяжелых углеводородов, при этом осушаемая смесь газов может иметь более высокое содержание исходной воды и тяжелых углеводородов.[15]

Такая установка предназначена для осушки природного газа от воды и тяжелых углеводородов. Недостатками является то, что ухудшается концентрация извлекаемого целевого продукта посредством его разбавления продувочным газом. Кроме того, наличие каналов продувки полости низкого давления способствует увеличению массового расхода газового потока на компрессор, что приводит к повышению потребляемой мощности и металлоемкости оборудования.

В качестве установки очистки природного газа от гелия также используется установка, которая содержит мембранные устройства с полостями высокого и низкого давления, разделенными полупроницаемой мембраной - патент RU №103744 от 27.04.2011. Она снабжена нагревателем, установленным на подводящем трубопроводе непосредственно перед мембранным модулем, что обеспечивает стабильную работу устройства.[16] На рисунке 9 представлена схема установки очистки природного газа от гелия.

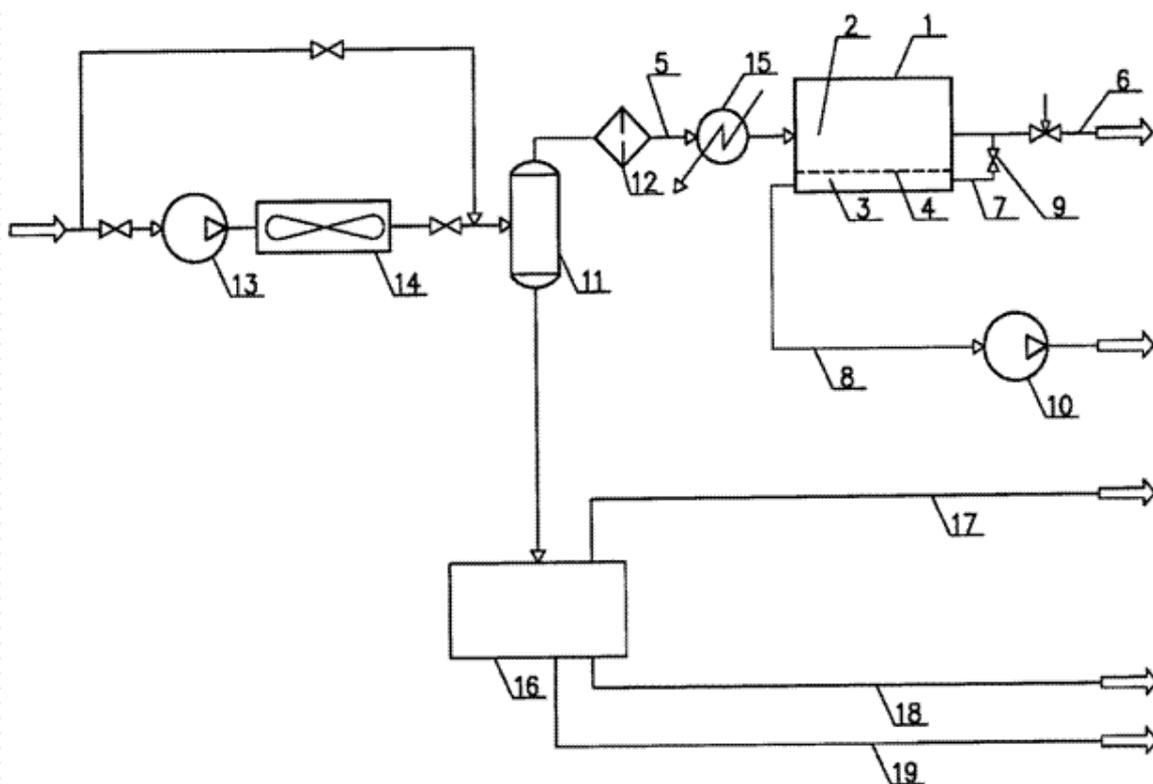


Рисунок 9 – Схема установки очистки природного газа от гелия

Установка очистки природного газа от гелия содержит:

1 – мембранный модуль;

- 2, 3 – полости высокого и низкого давления соответственно;
- 4 – полупроницаемая мембрана;
- 5 – подводящий трубопровод;
- 6 – трубопровод, отводящий поток не проникшего газа;
- 7 – продувочный канал;
- 8 – трубопровод отвода смеси проникшего и продувочного газов;
- 9 – дросселирующий элемент;
- 10 – вакуум-компрессор;
- 11 – сепаратор;
- 12 – фильтр для очистки природного газа от конденсата и механических примесей;
- 13 – компрессор;
- 14 – холодильник;
- 15 – нагревателем;
- 16 – блок стабилизации конденсата;
- 17 – трубопровод сброса газа на утилизацию или сжигание;
- 18 – трубопровод отвода углеводородного конденсата на дальнейшую переработку либо для закачки в нефтяной пласт;
- 19 – трубопровод отвода водного конденсата.

Установка может быть снабжена по крайней мере одним дополнительным мембранным модулем, при этом все мембранные модули соединены параллельно друг с другом с образованием мембранного газоразделительного блока. Мембрана 4 каждого мембранного модуля выполнена в виде полупроницаемых полых волокон.

Установка очистки природного газа работает следующим образом:

Сырьевой природный газ высокого давления с содержанием гелия 0,2-1,0% об. подается в мембранный модуль 1 (или в мембранные модули мембранного газоразделительного блока) по подводящему трубопроводу 5. Предварительно природный газ очищается от конденсата и механических

примесей в сепараторе 11 и фильтре 12, в качестве которого может быть использован коалесцентный фильтр. Температура природного газа перед подачей его в мембранный модуль 1 может быть повышена в нагревателе 15. В случае низкого давления подаваемого природного газа в установке может быть использован компрессор 13 и холодильник 14. Предварительно очищенный природный газ поступает в полость 2 высокого давления мембранного модуля 1, из которой непроникший через мембрану 4 газ по отводящему трубопроводу 6 подается к потребителю с содержанием гелия 0,1% об. Часть непроникшего газа из отводящего трубопровода 6 по продувочному каналу 7 с дросселирующим элементом 9 поступает в полость 3 низкого давления для продувки ее от проникшего газа. Образованная смесь проникшего газа и продувочного газа с содержанием гелия 1,5-5% об. удаляется из полости 3 низкого давления по трубопроводу 8. Вакуум-компрессор 10, установленный на трубопроводе 8, обеспечивает понижение давления смеси проникшего и продувочного газов в полости 3 низкого давления и подачи данной смеси на утилизацию в хранилище или закачивание в природный пласт либо на дальнейшую переработку. Производительность вакуум-компрессора 10, параметры дросселирующего элемента 9 в продувочном канале 7 и давление газов в трубопроводе 8 выбираются из условия максимальной для используемого мембранного модуля 1 степени извлечения очищенного газа, а, следовательно, минимальных энергозатрат на процесс очистки.

Конденсат из сепаратора 11 направляется или непосредственно на утилизацию, например, путем закачки его в пласт для поддержания пластового давления, или подается в блок 16 стабилизации конденсата, если им оснащена установка. В последнем случае из блока 16 стабилизации конденсата выходят три потока, а именно, по трубопроводу 17 осуществляется сброс газа на утилизацию или сжигание, по трубопроводу 18 происходит отвод углеводородного конденсата на дальнейшую переработку либо для закачки в нефтяной пласт, а по трубопроводу 19 производится отвод водного конденсата.

Таким образом, в установке за счет наличия вакуум-компрессора 10, установленного в трубопроводе 8 отвода смеси проникшего и продувочного газов, и продувочного канала 7 с дросселирующим элементом 9 обеспечивается стабильная и эффективная работа мембранного модуля 1 или мембранного газоразделительного блока, что позволяет повысить степень извлечения гелия и уменьшить энергозатраты на проведение процесса очистки. Стабильную работу мембранного модуля 1 или мембранного газоразделительного блока обеспечивают и средства предварительной подготовки природного газа, а именно сепаратор 11, фильтр 12 и нагреватель 15. Кроме того, в установке решены задачи с утилизацией отходов очистки природного газа.[16]

Однако для работы установки очистки природного газа от гелия требуется внешний источник подогрева, что является существенным недостатком. Также к недостаткам следует отнести высокие энергозатраты, поскольку для полной очистки всего объема природного газа необходимо его многократное компримирование, так как за один цикл отбирается только 15% от входного потока.

Известна установка очистки природного газа высокого давления от гелия (патент RU №114423 от 27.03.2012). В установке реализована двухступенчатая схема мембранного газоразделения без рециклов, с одним межступенчатым компрессором и компрессорным агрегатом для повышения давления низконапорного пермеата второй ступени.[17] Схема установки очистки природного газа высоко давления от гелия представлена на рисунке 10.

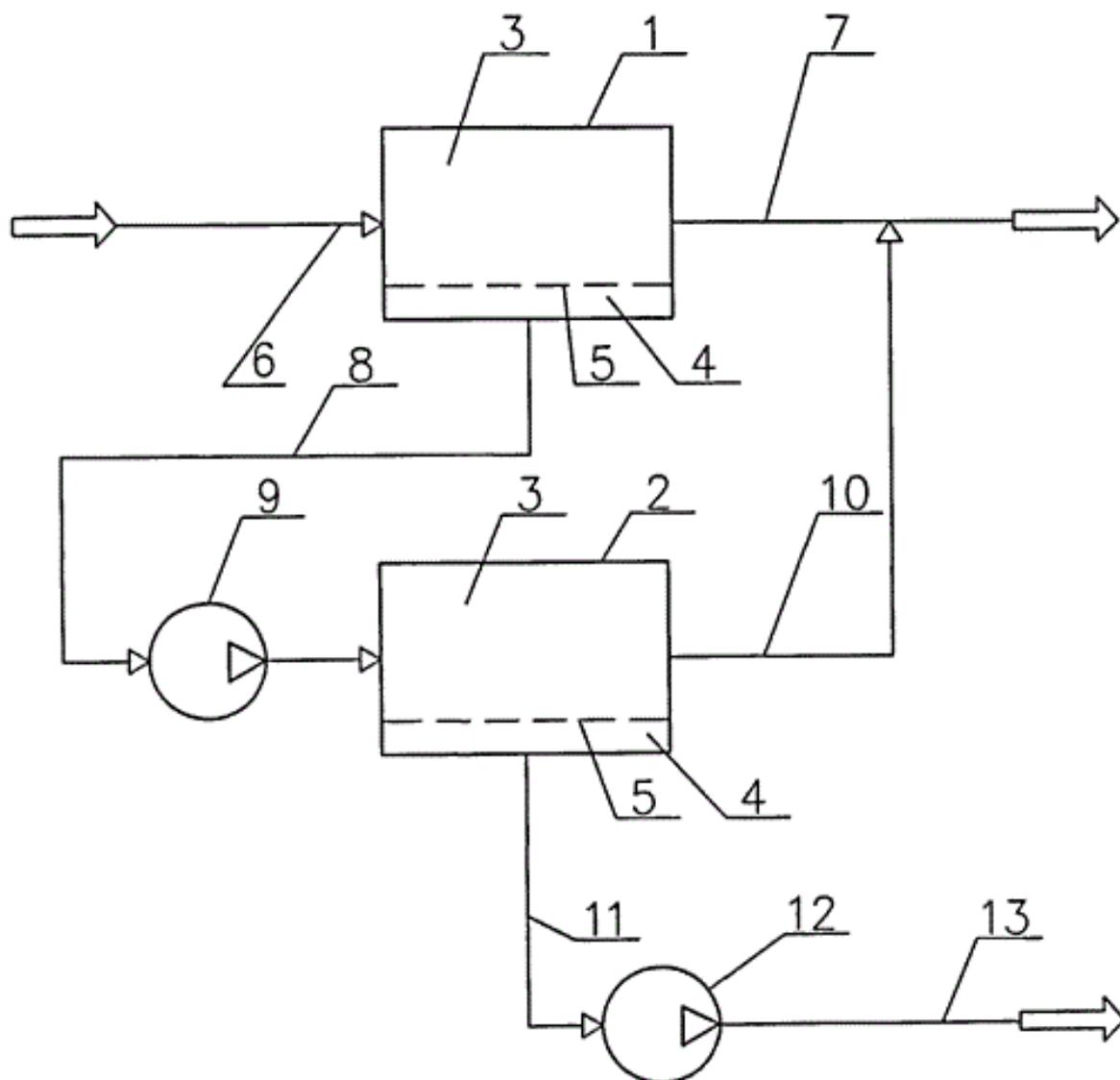


Рисунок 10 – Установка очистки природного газа высокого давления от гелия

Установка очистки природного газа высокого давления от гелия состоит:

1, 2 – мембранные модули;

3, 4 – полости низкого и высокого давления соответственно,

5 – полупроницаемая мембрана,

6 – подводящий трубопровод;

7 – выходной трубопровод;

8 – трубопровод отвода проникшего газа;

9 – первый компрессор;

10 – трубопровод отвода не проникшей газовой смеси;

11 – трубопровод отвода проникшего газа;

12 – второй компрессор;

13 – трубопровод отвода газовой смеси с повышенным содержанием гелия.

Установка может быть снабжена дополнительными мембранными модулями, при этом к каждому из мембранных модулей 1 и 2 параллельно подключен по крайней мере один дополнительный мембранный модуль с образованием мембранного газоразделительного блока. В каждом мембранном модуле мембрана выполнена в виде полупроницаемых полых волокон.

Установка очистки природного газа высокого давления от гелия работает следующим образом:

Сырьевой природный газ высокого давления, содержащий гелий, подается в мембранный модуль 1 (или в мембранные модули мембранного газоразделительного блока) по подводящему трубопроводу 6. В мембранном модуле 1 происходит разделение природного газа на поток высокого давления не проникшего газа и поток газа, проникшего через мембрану 5. Поток газа, не проникшего в мембранном модуле 1, с минимальным содержанием гелия направляется из установки по выходному трубопроводу 7 к потребителю, при этом данный очищенный природный газ поступает потребителю с остаточным содержанием гелия, соответствующим принятым нормам (не более 0,10% об.). Поток проникшего газа направляется по первому отводящему трубопроводу 8 в полость 3 высокого давления второго мембранного модуля 2, при этом поток проникшего газа компримируется первым компрессором 9. Из второго мембранного модуля 2 поток непроникшего газа по отводящему трубопроводу 10 поступает в выходной трубопровод 7. Проникший газ во втором мембранном модуле 2 с повышенным содержанием гелия направляется по трубопроводу 11 на вход второго компрессора 12. С выхода второго компрессора 12 газовая смесь с повышенным содержанием гелия по трубопроводу 13 отвода направляется либо на утилизацию, либо на дальнейшую переработку.

Таким образом, поскольку в данной установке очищенный от гелия природный газ поступает к потребителю от двух мембранных модулей 1 и 2, то она обладает повышенной производительностью при низких - энергозатратах.

Однако, недостатками такой установки является то, что на первой ступени концентрация гелия снижается примерно в 10-20 раз с умеренной долей потока пермеата и этого, как правило, достаточно для гелийсодержащих месторождений природного газа с концентрацией гелия 0,10-0,80% мольн. Однако, на второй ступени, чтобы объединить два потока подготовленного газа, необходимо снизить концентрацию гелия уже примерно в 100-200 раз, так как на вход второй ступени поток газа будет иметь существенно повышенную концентрацию гелия. Такой вариант труднодостижим на второй ступени, требует дополнительных решений, например, существенное увеличение площади мембранного разделения на второй ступени и увеличение отбора в пермеат, что приведет к увеличению нагрузки на компрессор, снизит концентрацию гелия на выходе и значительно увеличит потерю природного газа.[17]

С развитием новых центров газопереработки и газохимии, в том числе на базе месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока, которые обладают внушительными запасами гелия, накопленного в составе газа и нефти, возрастает необходимость в разработке и реализации проектов, способных обеспечить переработку столь большого объема сырья, с соблюдением высоких требований, предъявляемых к качеству конечной продукции.

Одним из таких крупных проектов, связанных с переработкой газа и выделением из его состава гелия и других ценных компонентов, являлся проект строительства установки мембранного выделения гелиевого концентрата на базе Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения.

В заявленной полезной модели реализована двухступенчатая схема установки мембранного разделения газовой смеси высокого давления, в которой вторая ступень выполнена двухсекционной и осуществляется рецикл пермеата

второй секции. Секции расположены последовательно и имеют различное целевое использование их пермеатных потоков.[18]

Полученный технический результат заключается в повышении степени извлечения целевого компонента из газовой смеси, например, гелия из природного газа, и ресурсосбережении, а именно минимизации совокупного показателя: потери метана в сочетании с эксплуатационными затратами на энергоемкость компрессорного оборудования.

Технический результат достигается за счет того, что в установке мембранного разделения газовой смеси высокого давления, содержащей мембранные устройства первой и второй ступени включающие мембранные модули с полостями высокого и низкого давления, разделенные полупроницаемой мембраной, межступенчатый компрессор, холодильник, сепаратор, нагреватель, при этом полость высокого давления мембранных модулей первой ступени с одной стороны сообщена с подводным трубопроводом, с другой стороны с трубопроводом выходного потока подготовленного газа первой ступени, полость низкого давления мембранных модулей первой ступени сообщена с трубопроводом отвода пермеатного потока первой ступени, соединенным с всасывающим трубопроводом межступенчатого компрессора, выход которого сообщен напорным трубопроводом, в котором последовательно установлены холодильник, сепаратор, нагреватель, с полостью высокого давления мембранного устройства второй ступени, подключенной с другой стороны к трубопроводу отвода потока подготовленного газа второй ступени, мембранное устройство второй ступени содержит, по меньшей мере, две последовательно расположенные секции, при этом полость низкого давления мембранных модулей первой секции подключена к трубопроводу отвода пермеатного потока, полость низкого давления мембранных модулей второй секции сообщена трубопроводом отвода пермеатного потока с трубопроводом отвода пермеатного потока мембранного устройства первой ступени, кроме этого нагреватель выполнен в виде рекуперативного теплообменника который

подключен к трубопроводу подачи нагревающей среды и трубопроводу отвода нагревающей среды, которые соединены с напорным трубопроводом межступенчатого компрессора, а по нагреваемой среде подключен к выходному трубопроводу сепаратора, причем на участке нагнетательного трубопровода межступенчатого компрессора между трубопроводом подачи нагревающей среды и трубопроводом отвода нагревающей среды расположено первое запорно-регулирующее устройство, а второе запорно-регулирующее устройство расположено на трубопроводе подачи нагревающей среды в рекуперативный теплообменник.[18]

Более подробно заявленное техническое решение поясняется чертежом, на котором изображена схема двухступенчатой установки мембранного разделения газовой смеси высокого давления с рециклом пермеата второй секции второй ступени (рисунок 11).

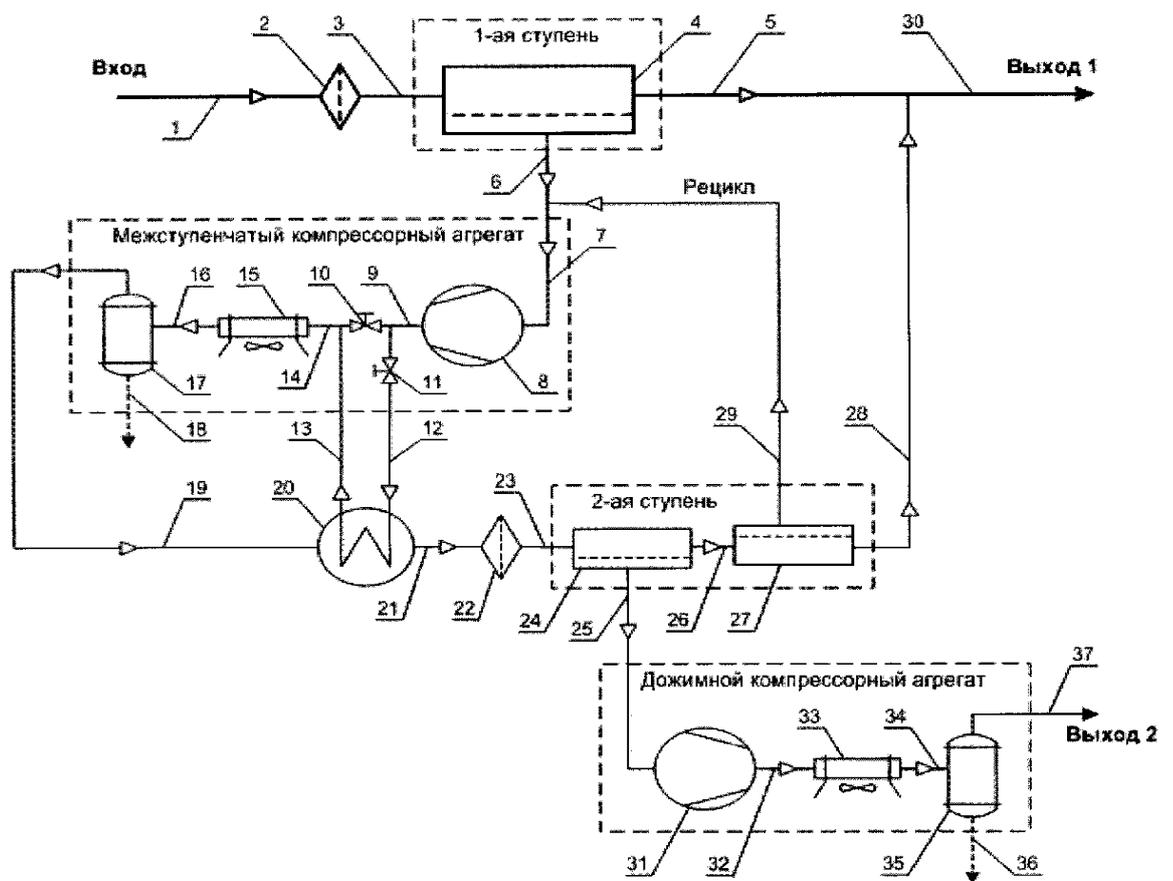


Рисунок 11 - Схема двухступенчатой установки мембранного разделения газовой смеси высокого давления с рециклом пермеата второй секции второй ступени

Указанные на схеме позиции обозначают следующие элементы компоновки технологического оборудования:

1 - подводящий трубопровод кондиционного природного газа высокого давления;

2 - фильтр тонкой очистки по механическим примесям;

3 - трубопровод природного газа для подачи на вход первой ступени мембранного газоразделения;

4 - мембранное устройство первой ступени;

5 - выходной трубопровод потока подготовленного газа первой ступени с допустимой остаточной концентрацией извлекаемых газовых компонент,

6 - трубопровод отвода низконапорного пермеатного потока первой ступени,

7 - всасывающий трубопровод межступенчатого компрессора,

8 - межступенчатый компрессор,

9 - напорный трубопровод межступенчатого компрессора,

10 - первое запорно-регулирующее устройство,

11 - второе запорно-регулирующее устройство,

12 - трубопровод подачи нагревающей газовой среды,

13 - трубопровод отвода нагревающей среды,

14 - подводящий трубопровод к холодильному оборудованию,

15 - холодильник, например аппарат воздушного охлаждения,

16 - трубопровод охлажденного потока газа, поступающего на сепаратор,

17 - сепаратор типа «газ-жидкость»,

18 - трубопровод отвода жидкой фракции из сепаратора,

19 - выходной трубопровод сепаратора,

20 -нагреватель, например, рекуперативный теплообменник,

21 - трубопровод подачи подогретого газового потока на мембранное устройство первой секции второй ступени,

22 - фильтр тонкой очистки,

23 - трубопровод природного газа с требуемой степенью очистки по механическим примесям на вход второй ступени мембранного газоразделения,

24 - мембранное устройство первой секции второй ступени,

25 - трубопровод отвода низконапорного пермеатного потока первой мембранной секции второй ступени,

26 - трубопровод отвода потока из полости высокого давления предварительно подготовленного газа первой секции второй ступени,

27 - мембранное устройство второй секции второй ступени,

28 - трубопровод отвода потока подготовленного газа второй ступени с допустимой остаточной концентрацией извлекаемых газовых компонент,

29 - трубопровод отвода низконапорного пермеатного потока второй секции второй ступени,

30 - трубопровод объединенного выходного потока подготовленного товарного газа с допустимой остаточной концентрацией извлекаемых газовых компонент,

31 - дожимной компрессор,

32 - подводящий трубопровод к холодильному оборудованию,

33 - холодильник, например аппарат воздушного охлаждения,

34 - трубопровод охлажденного потока газа, поступающего на сепаратор,

35 - сепаратор типа "газ-жидкость",

36 - трубопровод отвода жидкой фракции из сепаратора,

37 - выходной трубопровод сепаратора с газовым потоком, в составе которого находятся при требуемом давлении и в предварительно сконцентрированном состоянии извлеченные газовые компоненты.

Мембранное устройство первой ступени содержит одну или несколько конструктивных стоек с параллельно-подключенными мембранными модулями, которые разделены полупроницаемой мембраной на полость высокого и низкого давления. Мембранное устройство второй ступени имеет каскадное исполнение в виде, как минимум двух, последовательно расположенных секций.

Входной поток на установку также может распределяться на несколько параллельно подключенных мембранных устройств первой ступени с идентичными газоразделительными свойствами используемых мембран. В этом случае распределение потоков будет осуществляться через регуляторы расходов с целью равномерной подачи питания на каждое мембранное устройство первой ступени.

Установка мембранного разделения газовой смеси высокого давления работает следующим образом.

Для данной полезной модели в качестве примера приведем вариант работы установки со следующими исходными данными. Концентрация по гелию входного газового потока примерно 0,5% мольн. Остаточная концентрация по гелию выходного газового потока - не более 0,05% мольн. Абсолютное рабочее давление газа на входе в установку 10,0 МПа, номинальное давление пермеата в мембранных модулях 0,15 МПа и температура мембранного газоразделения 50°C. Для пояснений рассмотрим идеализированную бинарную газовую смесь, состоящую только из метана и гелия. Идеальную селективность мембран по паре «гелий-метан» возьмем на уровне 80.

Кондиционный входной гелийсодержащий газовый поток по трубопроводу 1, пройдя фильтр тонкой очистки 2, поступает на мембранное устройство 4 первой ступени. Непосредственное извлечение гелия из природного газа происходит на мембранных картриджах, расположенных внутри мембранных модулей.

После извлечения в пермеат целевых газовых компонент, в выходной поток первой ступени по трубопроводу 5 проходит порядка 93,5% от входного потока газа с лимитированной остаточной концентрацией гелия не более 0,05% мольн. По трубопроводу 6 выходит низконапорный пермеатный поток первой ступени с извлеченным гелием. В трубопроводе 6 расход газа порядка 6,5% от входного потока, в составе которого еще достаточно много метана (примерный компонентный состав: метана 93,0% мольн. и гелия 7,0% мольн.).[18]

Поскольку поток пермеата после первой ступени низконапорный, а доля метана в нем еще существенна, то для дальнейшего извлечения гелия и высвобождения товарного метана он направляется на компримирование в межступенчатый компрессор 8 для дальнейшего мембранного разделения на второй ступени.

Дополнительно, к пермеатному потоку первой ступени добавляется часть низконапорного газа, поступающего по трубопроводу 29 от пермеата второй секции второй ступени (частичный рецикл), при этом, в объединенном потоке концентрация гелия не снижается, а несколько увеличивается, происходит дополнительное концентрирование. Объединенный низконапорный поток направляется по всасывающему трубопроводу 7 в межступенчатый компрессор 8 с целью дальнейшего мембранного разделения на второй ступени с концентрацией гелия уже несколько выше 7,0% мольн. за счет добавления рециркулирующего потока с более высокой концентрацией гелия.

Горячий газ, с температурой примерно от 100 до 150°C после компримирования на межступенчатом компрессоре 8, направляется по напорному трубопроводу 9 на регулируемое деление потоков с помощью запорно-регулирующих устройств 10 и 11.

В случае когда первое запорно-регулирующее устройство 10 находится в положении «закрыто», а второе запорно-регулирующее устройство 11 находится в положении «открыто», газ по трубопроводу нагревающей среды 12 направляется в рекуперативный теплообменник 20, по трубопроводу отвода нагревающей среды 13 и далее по трубопроводу 14 поступает в холодильник 15, например аппарат воздушного охлаждения, где охлаждается до требуемой температуры с целью подачи по трубопроводу 16 в сепаратор 17 типа «газ-жидкость». Извлечение гелия из природного газа сопровождается дополнительной осушкой природного газа по воде, то есть в сепараторе 17 выпадает после охлаждения сконденсированная вода в виде жидкой фракции при повышении влажности потока газа, поступающего на установку. Удаление воды

в жидкой фазе осуществляется с помощью дренажного отвода 18. Охлажденный поток газа из сепаратора 17 с температурой меньше рабочей, например 20°C, проходящий по выходному трубопроводу 19, имеет порядка 100% влажности и является нагреваемой средой для рекуперативного теплообменника 20.

Нагреватель, выполненный в виде рекуперативного теплообменника 20, установлен на выходном трубопроводе 19 для предотвращения крайне нежелательного для мембранного процесса газоразделения случайного попадания на мембрану второй ступени аэрозольной мелкодисперсной капельной жидкости (тумана). Температура потока газа на выходе из рекуперативного теплообменника повышается до рабочей температуры 50°C.

Изменение проходного сечения запорно-регулирующих устройств 10 и 11 позволяет регулировать степень подогрева потока газа в рекуперативном теплообменнике, что расширяет функциональные возможности установки и позволяет поддерживать рабочую температуру газа в трубопроводе 21 с обеспечением отсутствия мелкодисперсной капельной жидкости в виде тумана на входе во вторую ступень установки.[18]

Далее по трубопроводу 21 подачи подогретого газового потока, пройдя через фильтр тонкой очистки 22, скомпримированный пермеат первой ступени вместе с рециркулирующей частью пермеатного потока второй ступени поступает на вход мембранного устройства второй ступени. Входная концентрация гелия на вторую ступень в трубопроводе 23 составляет порядка 7% мольн. и более, однако требование по остаточной концентрации гелия в трубопроводе 28 не более 0,05% мольн.

Таким образом, на второй ступени необходимо снизить концентрацию гелия уже более чем в 140 раз. Реализовать с помощью мембранного газоразделения такое снижение концентрации гелия на второй ступени, включающей только одну секцию весьма проблематично для большинства коммерчески доступных мембран. Усугубляет ситуацию и повышенная входная концентрация гелия на второй ступени, что может привести к уменьшению

удельной производительности мембран второй ступени по сравнению с мембранами первой ступени. Этими факторами объясняется применение в заявляемой установке на второй ступени каскадного варианта мембранного газоразделения в виде, как минимум, двух последовательных секций.

Исполнение мембранного устройства второй ступени в виде каскада из двух последовательных секций позволяет получить два пермеатных потока, неравнозначных по концентрации гелия. Для увеличения совокупного эффекта по энергозатратам на компримирование и ресурсосбережение (потери метана в составе потока пермеата первой секции в трубопроводе 25) необходимо рациональное распределение нагрузок между двумя последовательными секциями второй ступени по снижению концентрации гелия. Требования по снижению концентрации гелия к первой секции второй ступени меньше, чем аналогичные требования ко второй секции, что приводит к наибольшему заявленному техническому эффекту.

На первой мембранной секции второй ступени 24 концентрация гелия снижается с 7,32% мольн., например, до 1,0% мольн. Доля пермеата первой секции второй ступени в трубопроводе 25 составляет около 10,0% от потока в трубопроводе 23. Пермеат первой секции второй ступени с высокой концентрацией гелия, порядка 64,3% мольн., выводится по трубопроводу 25 с последующим компримированием до требуемого давления на дожимном компрессоре 31 из установки как отдельный продукт.

Технологический прием по разбиению второй ступени на две последовательные секции (каскадный вариант) не снижает общей производительности установки в целом, так как отсутствуют рециркуляционные потоки на вход всей установки. Это позволяет отобрать основную массу гелия на первой секции второй ступени с примерным снижением концентрации гелия в 7,32 раза, и дополнительно довести его концентрацию до требуемой величины не более 0,05% мольн. на второй секции с дополнительным снижением концентрации гелия еще в 20 раз.

Функциональное назначение второй секции второй ступени заключается в следующем: довести извлечение гелия до требуемой остаточной концентрации не более 0,05% мольн.; рециркулирующим потоком пермеата по трубопроводу 29 несколько повысить концентрацию гелия на входе во вторую ступень мембранной установки (дополнительное обогащение); снизить концентрацию гелия на первой секции второй ступени и тем самым сократить потери метана, увеличивая выход товарного газа.

Выход товарного газа из установки в трубопроводе 30 с допустимой остаточной концентрацией гелия не более 0,05% мольн. составляет примерно 99,3% от входного потока. Второй выход из установки по трубопроводу 37 соответствует 0,7% входного потока и содержит извлеченный гелий с концентрацией порядка 64,3% мольн., то есть концентрация метана в нем на уровне 35,7% мольн., что эквивалентно потери метана вместе с извлеченным гелием на уровне 0,25% его входного потока.

Более того, количество последовательных секций на второй ступени можно увеличить до трех, при этом пермеатные потоки второй и третьей секций объединяются и направляются по рециклу по тому же принципу на всас межступенчатого компрессора. Технологическая схема установки с тремя последовательными секциями на второй ступени будет полностью соответствовать поясняющему заявленному техническому решению чертежу, так как на второй ступени по-прежнему будет оставаться два пермеатных потока. Такое компоновочное выполнение установки несколько увеличит нагрузку на межступенчатый компрессор, но даст еще больший эффект по снижению потерь метана в составе, отводимого по трубопроводу 25 пермеатного потока первой секции второй ступени, а концентрация гелия в нем может превысить 80% мольн.

Использование трех и более последовательных секций на второй ступени целесообразно с учетом концентрации гелия, поступающего на вторую ступень, режимов давлений, температур, а также свойств применяемых мембран по производительности и селективности.

Последующее использование газового потока с извлеченными компонентами, включая гелий, может применяться, например, для:

- хранения и накопления путем закачки пермеата в продуктивный пласт гелийсодержащего месторождения или в специализированное подземное хранилище газа;

- очистки от посторонних газовых примесей с целью получения гелиевого концентрата как исходного сырья для получения товарного гелия;

- дальнейшего концентрирования с целью высвобождения метановой составляющей, а также для иных технологических целей.

Также данная полезная модель может использоваться для извлечения водорода из природного газа и для уменьшения в природном газе содержания CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S с применением мембран, обладающих хорошей химической стойкостью к этим газовым компонентам. Сопутствующий эффект будет иметь место и в дополнительной глубокой осушке природного газа, поступающего на установку, так как для большинства мембран селективность по паре «вода-метан» достаточно высокая.

Следует добавить, что в предложенной установке за счет рецикла немного повышается нагрузка на межступенчатый компрессор 8, однако, снижается нагрузка на дожимной компрессор 31. При этом суммарное увеличение энергозатрат из-за рецикла является незначительным, а количество сохраненного метана, если его рассматривать как топливный газ, может в несколько десятков раз превышать дополнительные энергозатраты.

Предложенная установка относительно проста в исполнении. Техническое решение, реализуемое полезной моделью, позволяет в достаточной мере извлекать целевые компоненты в нужном объеме, например, гелий из природного газа, при этом уменьшать потерю метана сохранив его для подачи в магистральный газопровод в качестве товарного газа, а с точки зрения ресурсо- и энергосбережения, это является наиболее эффективным подходом к процессу мембранного газоразделения.

### 2.3 Метод газогидратного обогащения природного газа гелием

Научный интерес к разработкам методов извлечения гелия из состава природного газа в процессе производства газовых гидратов в промышленных масштабах обусловлен, в первую очередь, перспективами получения более высокоэнергетического вида топлива чем существующие на данный момент на рынке. Помимо этого, термобарические условия для реализации газогидратного процесса - 10 МПа и 0 °С, что значительно мягче условий, необходимых для криогенного фракционирования. Из этого следует, что энергозатраты на достижение необходимых условий при выделении из состава газа таких компонентов как гелий или водород (если в качестве сырья используется синтез-газ) существенно сокращаются.

Наиболее успешным проектом по созданию промышленных гидратообразующих установок является проект японской компании Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Схема процесса получения газовых гидратов из сырьевого газа и воды по технологии Mitsui Engineering & Shipbuilding Co представлена на рисунке 12.

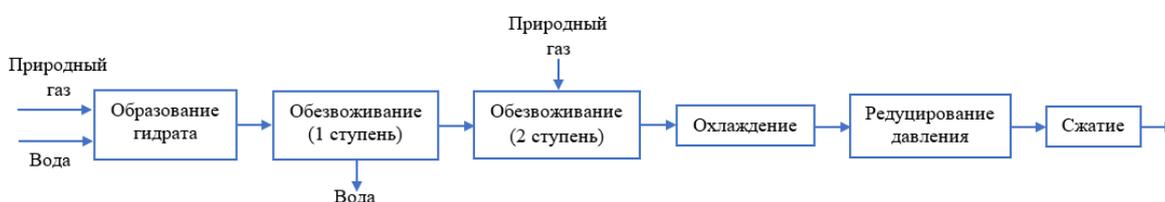


Рисунок 12 – Процесс образования гидрата газа по технологии Mitsui Engineering & Shipbuilding Co (патент - US20040020123A1)

На установках компании для получения газовых гидратов используется интенсивное перемешивание и барботаж газа через слой жидкости. В условиях, когда гидрат не является целевым продуктом, более целесообразным может являться применение других методов.[19]

В составе природного газа концентрация гелия может достигать нескольких процентов, что делает традиционный метод обогащения гелием природного газа за счет образования газовых гидратов не выгодным с точки зрения затраты большого количества времени. Основным условием ускорения

процесса гидратообразования является увеличение площади контакта фаз газ – жидкость. Один из перспективных методов предусматривает использование гидрофобных частиц. При интенсивном смешивании воды воздуха и таких частиц происходит процесс их налипания на высокодисперсные капли воды, что предотвращает дальнейшее слипание капель. В данном случае система остается проницаемой для газа, вследствие чего происходит многократное увеличение доступной для взаимодействия с газом поверхности жидкости, что ускоряет процесс гидратообразования. При этом гелий в образовании гидрата участия не принимает. Условиями для получения равновесного состава газовой смеси, в которой концентрация гелия находится в пределах ~ 80% объема, являются давление 15 МПа и температура 0 °С (процесс осуществляется с использованием жидкой воды).[12] Для выбранных температуры и давления эта величина является предельно достижимой концентрацией гелия для гидратного процесса. В дальнейшем полученный гелиевый концентрат может быть подвержен тонкой очистке, для получения товарного гелия, соответствующего требованиям, установленным нормативными актами.

### 3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА ВЫДЕЛЕНИЯ ГЕЛИЯ ИЗ СОСТАВА ПРИРОДНОГО ГАЗА

Технологии выделения гелия из состава природного газа, рассматриваемые в ходе выполнения выпускной квалификационной работы имеют разную специфику и решают ряд задач, в зависимости от конкретных условий. Анализ технологических и отличительных особенностей различных методов выделения гелия из состава природного газа представлен в таблице 5. Таблица 5 – Анализ технологических и отличительных особенностей методов извлечения гелия из состава природного газа

| Технологии рассматриваемые в ходе выполнения ВКР   | Криогенный метод разделения природного газа:  | Технология мембранного разделения природного газа на компоненты:  | Метод газогидратного обогащения природного газа гелием:  |
|--|---|---|--|
| <p style="text-align: center;"><b>Технологические особенности рассматриваемых методов выделения гелия из состава природного газа</b></p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Рассматриваемая технология выделения газообразного гелия состоит из двух стадий: на первой стадии выделяется гелиевый концентрат с содержанием гелия не менее 80%, на второй — производится гелий высокой чистоты с содержанием ключевого компонента не ниже 99,99%, который и является товарной продукцией;</li> <li>– После первого этапа очистки природного газа гелиевый концентрат подается на подземное хранение или поступает в блок тонкой очистки гелия для получения товарного газообразного гелия;</li> <li>– В процессе криогенного разделения происходит также конденсация различных ценных фракций углеводородов;</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Основой мембранной технологии разделения газов является полимерная мембрана.</li> <li>– При извлечении гелия при помощи мембран движущей силой разделения является перепад давления на мембране, на входе разделяемого газа и выходе пермеата. Газы, быстро проникающие через полимерную мембрану, поступают внутрь волокон и выходят из мембранного картриджа через один из выходных патрубков. Газы, с низкой скоростью проникновения выходят из мембранного модуля через второй выходной патрубок.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– В основе технологии лежит процесс перехода природного газа из газообразного состояния в твердое с участием в реакции установленного количества воды при определенных термобарических условиях. В отличие от большинства компонентов газа гелий не образует с водой гидратов при низких температурах и высоких давлениях;</li> </ul> |

Продолжение таблицы 5

| Технологии рассматриваемые в ходе выполнения ВКР   | – Криогенный метод разделения природного газа:  | Технология мембранного разделения природного газа на компоненты:  | – Метод газогидратного обогащения природного газа гелием:  |
|--|---|---|--|
| <p><b>Технологические особенности рассматриваемых методов выделения гелия из состава природного газа</b></p> | <p>– Технологические процессы получения гелия криогенным методом характеризуются широким диапазоном колебания температур – от -203 °С до +430 °С, и давления – от глубокого вакуума до 400 атм. Такие экстремальные изменения термобарических условий требуют применения соответствующих материалов и оборудования.</p>   | <p>– Диапазон рабочих температур установки колеблется в пределах от 35 до 60°С;<br/>– Для технологий мембранного разделения углеводородных газов могут применяться мембраны полуволоконного или рулонного типа. Современный мембранный модуль состоит из сменного мембранного картриджа и корпуса. Плотность упаковки волокон мембраны позволяет минимизировать размеры установок.</p>  | <p>– Термобарические условия для реализации газогидратного процесса - 10 МПа и 0 °С;<br/>Большие капиталозатраты связаны с использованием большого объема воды для протекания процесса искусственного гидратообразования.</p>  |
| <p><b>Отличительные особенности методов выделения гелия из состава природного газа</b></p>                   | <p>– Сырье для переработки на гелиевом заводе – природный газ с содержанием гелия до 0,055%. В мировой практике использование такого сырья для производства гелия экономически не выгодно. Однако движущей силой в реализации проекта являлся газовый потенциал Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения;<br/>– Основной продукт, получаемый в ходе применения данной технологии – сжиженный природный газ. Гелий в технологической цепочке криогенного разделения является побочным продуктом;<br/>– Отличительной особенностью криогенной технологии является использование критически низких температур.</p> | <p>Для разделения газа с использованием мембранных технологий нет необходимости в его глубокой очистке от нежелательных примесей, а именно:<br/>– Содержание влаги допускается до значений температуры точки росы (ТТР) -20 °С;<br/>– Нет необходимости в предварительном извлечении CO<sub>2</sub>, поскольку для мембранного извлечения гелия нет ограничений по содержанию углекислого газа.<br/>Помимо менее строгих требований, предъявляемых к составу исходного газа, у мембранных технологий существует ряд других особенностей, таких как:<br/>– Отсутствуют движущиеся части в мембранном модуле;</p> | <p>– Получаемые в ходе протекания процесса обогащения газы гидраты являются перспективным высокоэнергетическим топливом;<br/>– Отсутствие необходимости в поддержании низких значений температур говорит о сравнительно небольших затратах на электроэнергию;<br/>– В сравнении с другими технологиями метод газогидратного обогащения природного газа гелием прост в аппаратном исполнении;</p> |

Продолжение таблицы 5

| Технологии рассматриваемые в ходе выполнения ВКР   | Криогенный метод разделения природного газа:  | Технология мембранного разделения природного газа на компоненты:   | Метод газогидратного обогащения природного газа гелием:  |
|--|---|--|--|
| <p><b>Отличительные особенности методов выделения гелия из состава природного газа</b></p> | <p>С этой особенностью также связаны большие капиталовложения, необходимые для реализации такого проекта. Оборудование по подготовке газа занимает значительные площади, требует больших затрат на обслуживание и потребляет значительное количество энергоресурсов;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Эффективность применения криогенных методов компонентного разделения природных газов, несмотря на высокие энергетические затраты, обуславливается тем, что это дает возможность на различных стадиях попутно получать ценные товарные продукты – этан, метановую фракцию и ШФЛУ;</li> <li>– Несмотря на требования, предъявляемые к исходному составу газа, строго регламентирующие предельно допустимые концентрации компонентов входящих в его состав, технологические особенности установки допускают содержание частиц механических примесей размером до 50 мкм;</li> </ul> <p>Применение технологии криогенного выделения гелия из состава природного газа дает возможность получать товарный гелий, степень очистки которого соответствует ТУ 0271-135-31323949-2005 «Гелий газообразный (сжатый)».</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Компрессоры, необходимые для закачки пермеата в мембранный модуль, как правило, имеют незначительную мощность и не требуют резерва.</li> <li>– В случае выхода из строя компрессора мембранные установки отключаются и газ перенаправляется по байпасной линии в обход установки;</li> <li>– Особенностью метода является возможность регулирования мощности установки путем изменения числа мембранных модулей;</li> <li>– Применение аппаратов проточного типа позволяет обеспечить быстрый пуск и остановку технологического процесса при необходимости;</li> <li>– Температурный диапазон работы современных мембранных установок составляет от 35 до 60°С;</li> <li>– Устойчивость технологии к колебаниям содержания целевого компонента в исходном сырье, в данном случае гелия;</li> </ul> <p>Важными отличительными особенностями являются возможность полной автоматизации с удаленным управлением установкой и возможность работы в непрерывном и периодическом режимах.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Относительная безопасность технологии связана с отсутствием оборудования, работающего под высоким давлением и отсутствием оборудования, содержащего большие концентрации токсичных компонентов природного газа;</li> </ul> <p>Метод газогидратного обогащения природного газа гелием является экспериментальным и не имеет полномасштабной промышленной реализации.</p> |

На основании проведенного сравнительного анализа технологий даются рекомендации по выбору оптимального метода выделения гелия из состава природного газа в условиях газового или газоконденсатного месторождения.

Как правило, криогенные технологии по извлечению гелия применяют для крупнотоннажного производства с выделением из природного газа всех ценных компонентов (гелий, этан, пропан, бутан, пентаны и др.) и выделением избыточного количества азота для повышения теплотворной способности газа до требуемых значений. Это связано в первую очередь с необходимостью проведения подготовки газа к криогенным температурам. Необходимо удалить из газа нежелательные примеси - воду, углекислый газ, сернистые соединения, ртуть и ряд других примесей. Использование криогенной технологии позволяет производить, кроме гелия, другие компоненты природного газа высокого качества, такие как: этан, метановая фракция, ШФЛУ. Однако, оборудование по подготовке газа занимает значительные площади, требует больших затрат на обслуживание (организацию факельного хозяйства, операторных бункерного типа, промежуточных компрессоров и т.д.) и потребляет значительное количество энергоресурсов (электроэнергии, водяного пара, топливного газа). При выделении только гелия из состава природного газа эти затраты потенциально окупаются исключительно при производстве значительных объемов гелиевого концентрата с высокой концентрацией гелия, начиная с 80%.

На данный момент основными проблемами, препятствующими использованию на практике газогидратного метода, являются отсутствие экспериментальных данных о распределении компонентов гелийсодержащих газовых смесей между газовой и гидратной фазами, отсутствие данных о количественных параметрах газогидратного разделения гелийсодержащих газовых смесей и сравнительно низкая скорость образования газовых гидратов. Гидратообразование – это энергозатратный и ресурсоемкий метод, так как в зависимости от концентрации гелия в исходном сырье воды требуется в

соотношении от 20:1 до 100:1. Также при использовании данного метода усложняется процесс последующей глубокой осушки гелиевого концентрата.

В том случае, если не требуется производство гелия высокой чистоты, и необходимо получить гелиевый концентрат, который затем при необходимости может быть отправлен на окончательную осушку, при этом значительные не реализуемые объемы гелиенасыщенного потока будут направлены на долгосрочное хранение в разрабатываемую залежь наиболее коммерчески оправдано использование мембранной технологии выделения гелия из состава природного газа.

Основным преимуществом мембранной технологии, значительно уменьшающим стоимость затрат в сравнении с криогенной технологией, является проведение разделения газа при невысоких температурах от 35 до 60 °С без необходимости осуществления фазовых превращений. Важно, что при работе мембранных систем возможна полная автоматизация с удаленным управлением установкой. Это исключает необходимость постоянного пребывания людей для контроля за ходом технологического процесса. Кроме того, отсутствие движущихся частей в корпусе мембранных модулей увеличивает срок службы такой установки и способствует формированию более безопасной рабочей среды.

Использование мембран с целью извлечения гелия из состава природного газа позволяет значительно снизить затраты энергоресурсов на процесс подготовки газа, уменьшить затраты на оборудование установки, а также уменьшить количество технологического персонала, необходимого для обслуживания установок подготовки газа в сравнении с традиционной криогенной технологией.

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

Студенту:

|        |                                 |
|--------|---------------------------------|
| Группа | ФИО                             |
| 2Б7П   | Свинухову Богдану Владимировичу |

|                     |             |                           |   |
|---------------------|-------------|---------------------------|---|
| Школа               | ИШПР        | Отделение школы (НОЦ)     | ОНД   |
| Уровень образования | Бакалавриат | Направление/специальность | 21.03.01 «Нефтегазовое дело», профиль: «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» |

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

|  |  |
|--|--|
| 1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих | Стоимость выполняемых работ, материальных ресурсов, согласно применяемой техники и технологии, в соответствии с рыночными ценами не более 1,02 млрд. руб |
| 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов   | Нормы расхода материалов, инструмента, норма амортизации и т.д.  |
| 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования                                  | Общая система налогообложения<br>Налог на прибыль – 20 %<br>НДС – 20%  |

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

|   |  |
|---|--|
| 1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности применения технологии мембранного выделения геля с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения | Технико-экономическое обоснование целесообразности внедрения техники или технологии выполнения работ. Проведение SWOT- анализа |
| 2. Планирование и формирование бюджета научных исследований   | Расчёт экономических показателей для внедрения мембранной технологии газоразделения  |
| 3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования                             | Оценка технологической и экономической эффективности внедрения технологии  |

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

1. Карта сегментирования рынка услуг;
2. Матрица SWOT;
3. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности технологии;
4. Диаграмма Ганта;
5. Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений.

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

**Задание выдал консультант:**

|                         |                           |                        |         |      |
|-------------------------|---------------------------|------------------------|---------|------|
| Должность               | ФИО                       | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| доцент ОСГН ШБИП<br>ТПУ | Спицына Любовь<br>Юрьевна | К.Э.Н.                 |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

|        |                              |         |      |
|--------|------------------------------|---------|------|
| Группа | ФИО                          | Подпись | Дата |
| 2Б7П   | Свинухов Богдан Владимирович |         |      |

## **4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Основная цель расчетов – экономическая оценка эффективности работы двух предлагаемых решений для процесса извлечения гелия из состава природного газа с целью дальнейшей отправки его больших нереализованных объемов на долгосрочное хранение в разрабатываемую залежь.

Экономическая эффективность проекта выражается в расчете прибыли от использования наиболее коммерчески эффективной технологии разделения природного газа. При этом учитываются все затраты: затраты на материалы, затраты на работу спецтехники, затраты на оборудование, необходимое для строительства и эксплуатации промышленной установки, затраты на использование энергоресурсов для работы установки, налоговые исчисления.

Таким образом, целью данного раздела является экономическое обоснование выбора конкретной технологии извлечения гелия из состава природного газа, поскольку только на основании экономических показателей, таких как показатель экономического эффекта, прибыль от реализации применения данного метода, период окупаемости можно судить об экономической эффективности предлагаемых технологий. Численные значения этих показателей дают полное представление об экономической эффективности предлагаемых методов компонентного разделения газа, позволяют определить превышение стоимостной оценки результатов над стоимостной оценкой затрат, совокупный доход предприятия, уменьшенный на величину эксплуатационных затрат.

### **4.1 Предлагаемые технические решения для реализации процесса выделения гелия из состава природного газа на Чайнинском НГКМ**

Для организации процесса газоразделения рассматриваются две существующие технологии:

- Технология разделение природного газа криогенным методом;

- Технология мембранного выделения гелиевого концентрата.

Оба метода имеют на сегодняшний день широкую распространенность в мире и находят применение на производстве исходя из конкретных условий и решаемых задач.

Для анализа заинтересованности технологиями необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будут востребованы предлагаемые технологии. Для предлагаемых решений целевым рынком являются предприятия газодобывающей и газоперерабатывающей отрасли. Сегментирование производится на примере двух организаций:

- ПАО «Криогенмаш» является крупнейшей компанией в России по производству технологий и оборудования по криогенной переработке попутного, природного газа и СПГ. На оборудовании, изготовленном Криогенмаш, выпускается около 70% годового объема производства технических газов в России. На сегодняшний день Криогенмаш в состоянии обеспечить полный цикл работ по созданию и модернизации газоразделительных производств – от разработки проектной документации, изготовления и монтажа оборудования, проведения строительно-монтажных и пуско-наладочных работ до проведения сервисного обслуживания, регламентных работ и обучения специалистов в собственном учебном центре. Всё это позволяет значительно сократить сроки ввода оборудования в эксплуатацию и гарантировать высокое качество и стабильность работы оборудования;

- Generon IGS — ведущий мировой производитель некриогенного газоразделения мембранным методом. Производственные мощности и заводы, сертифицированные Generon ISO 9000, ASME, PED, GOST и UL 508A / CSA-C22.2 в Техасе и Калифорнии, обеспечивают продукцию высокого качества. Generon — лидер в разработке и производстве полых волоконных мембранных модулей для разделения воздушных и технологических газов. Компания Generon производит модули из полуволоконных мембран более 50 лет и имеет более 100

000 единиц в эксплуатации в нефтехимической, нефтегазовой отраслях промышленности.

Таким образом в таблице 6 представлена карта сегментирования рынка исходя из потенциальной заинтересованности различных предприятий данными технологиями:

Таблица 6 - Карта сегментирования рынка технологий газоразделения

|                 |         | Вид применяемой технологии газоразделения |                       |
|-----------------|---------|---|-----------------------|
|                 |         | Мембранная технология                     | Криогенная технология |
| Размер компании | Крупные | +   | +                     |
|                 | Средние | +   | -                     |
|                 | Мелкие  | +   | -                     |

Из карты сегментирования можно сделать вывод о том, что мембранные технологии Generon IGS имеют большой потенциал к росту реализации проектов систем выделения гелия из состава природного газа в силу большей универсальности предлагаемой технологии.

#### 4.2 Технология QuaD

Построена оценочная карта сравнения конкурентных технических решений в таблице 7.

Таблица 7 — Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений

| Критерии оценки   | Вес критерия | Баллы | Максимальный балл | Относительное значение | Средневешенное значение |
|---|--------------|-------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| <b>Показатели оценки качества проведения технологии</b> |              |       |                   |                        |                         |
| 1. Энергоэффективность                                  | 0,15         | 85    | 100               | 0,85                   | 12,75                   |
| 2. Ремонтпригодность                                    | 0,03         | 75    | 100               | 0,75                   | 2,25                    |
| 3. Надежность   | 0,05         | 80    | 100               | 0,8                    | 4                       |
| 4. Унифицированность                                    | 0,08         | 80    | 100               | 0,8                    | 6,4                     |
| 5. Уровень материалоемкости разработки                  | 0,05         | 65    | 100               | 0,65                   | 3,25                    |
| 6. Уровень шума   | 0,02         | 75    | 100               | 0,75                   | 1,5                     |
| 7. Безопасность   | 0,08         | 90    | 100               | 0,9                    | 7,2                     |
| 8. Потребность в ресурсах памяти                        | 0,02         | 50    | 100               | 0,5                    | 1                       |
| 9. Функциональная мощность                              | 0,05         | 75    | 100               | 0,75                   | 3,75                    |
| 10. Удобство в эксплуатации                             | 0,02         | 80    | 100               | 0,8                    | 1,6                     |

Продолжение таблицы 7

|  |          |    |     |      |      |
|--|----------|----|-----|------|------|
| 11. Качество<br>Интеллектуального интерфейса                 | 0,03     | 75 | 100 | 0,65 | 2,6  |
| 12. Возможность подключения в<br>сеть ЭВМ                    | 0,05     | 75 | 100 | 0,6  | 4,8  |
| <b>Показатели оценки коммерческого потенциала разработки</b> |          |    |     |      |      |
| 13. Конкурентоспособность<br>технологии                      | 0,06     | 90 | 100 | 0,9  | 9    |
| 14. Уровень проникновения на<br>рынок                        | 0,03     | 70 | 100 | 0,65 | 1,95 |
| 15. Цена   | 0,1      | 75 | 100 | 0,7  | 2,8  |
| 16. Послепродажное<br>обслуживание                           | 0,04     | 70 | 100 | 0,7  | 2,1  |
| 17. Финансовая эффективность<br>технологии                   | 0,07     | 90 | 100 | 0,9  | 4,5  |
| 18. Срок выхода на рынок                                     | 0,02     | 85 | 100 | 0,85 | 1,7  |
| 19. Наличие сертификации<br>разработки                       | 0,05     | 90 | 100 | 0,9  | 3,6  |
| <b>Итого</b>   | <b>1</b> |    |     |      |      |

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum B_i \cdot B_i \quad (4)$$

Где:

$P_{cp}$  – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности технологии;

$B_i$  – вес показателя;

$B_i$  – средневзвешенное значение  $i$ -го показателя.

Таким образом  $P_{cp} = 76,75$ . На основании проведенного расчета можно сделать вывод что технология имеет перспективность выше среднего, это соответствует необходимым требованиям.

### 4.3 Бюджет мембранной технологии извлечения гелия из состава природного газа

Основными показателями по принятию проекта мембранной установки к реализации являются затраты на оборудование установки, экономический

эффект, выраженный в сравнении себестоимости производства одной тонны гелиевого концентрата с применением криогенной технологии и мембранной. Необходимо провести анализ основных показателей эффективности внедрения технологии:

1. Основные показатели экономической оценки эффективности внедрения мембранного метода извлечения гелия:

В состав установки входят мембранные блоки первой и второй ступеней, в которых извлекается пермеат, фильтр, теплообменник (подогреватель) и сепаратор. Кроме этого, если газ имеет недостаточное давление для подачи на мембрану (не зависит от типа установок), то необходимо использование компрессора для создания нужного давления. Требуется компрессор для отправки пермеата на другую ступень для концентрирования и компрессор по рециклу очищенного газа ретанта в случае необходимости его дожатия на повторное извлечение. Стоимость компрессорного оборудования, обеспечивающего производительность  $\sim 100 \text{ м}^3 \text{ мин}^{-1}$  варьируется в довольно широком диапазоне, поэтому целесообразно осуществлять расчет стоимости этого оборудования через привязку к его мощности и исходить из соответствия  $1 \text{ кВт} = 40\,000 \text{ Р} (\sim 550 \text{ \$})$ . Отсюда, стоимость каждой используемой компрессорной установки в среднем будет составлять:  $14\,248\,000 \text{ Р} (\sim 195\,633 \text{ \$})$ ,  $50\,932\,000 \text{ Р} (\sim 699\,327 \text{ \$})$  и  $36\,048\,000 \text{ Р} (\sim 494\,961 \text{ \$})$  для каждого компрессора соответственно. Принимая стоимость  $1 \text{ м}^2$  мембраны равной  $4\,000 \text{ Р} (\sim 55 \text{ \$})$ , исходя из данных производителя мембраны Generon IGS можно рассчитать капитальные затраты на оборудование из следующей упрощенной формулы:

$$C = (A_{str} + A_{enr}) \times S_M + S_{C1} + S_{C2} + S_{C3}, \quad (5)$$

Где:

$A_{str}$  и  $A_{enr}$  – площадь используемой мембраны в секции извлечения и обогащения,  $\text{м}^2$ ;

$S_M$  – стоимость  $1 \text{ м}^2$  мембраны,  $\text{Р} / \text{м}^2 (\text{\$/ м}^2)$ ;

$S_{C1}$  – стоимость компрессорной установки К1,  $\text{Р} (\text{\$})$ ;

$S_{C2}$  – стоимость компрессорной установки К2, Р (\$);

$S_{C3}$  – стоимость компрессорной установки К3, Р (\$).

$$C \sim 330\,348\,000 \text{ Р или } 4\,535\,878 \text{ \$}.$$

2. Себестоимость производства одной тонны гелиевого концентрата:

Для расчета себестоимости выделения тонны гелиевого концентрата с использованием мембранной технологии была использована следующая формула:

$$C_{He} = \frac{(P \cdot T \cdot E) + (0,2 \cdot C)}{F_{He} \cdot T} \quad (6)$$

Где:

$C_{He}$  – стоимость выделения тонны, Р / тонна He (\$ / тонна He);

Р – работа компрессии, кВт;

Т – коэффициент функционирования снабжающей электростанции (время функционирования за год) ч/год;

Е – стоимость электроэнергии, Р / кВт·ч (\$ / кВт·ч);

С – капитальные затраты на оборудование, Р (\$);

$F_{He}$  – массовый поток выделенного He, тонн / ч.

Работа компрессии рассчитывается согласно формуле:

$$P = P_{C1} + P_{C2} + P_{C3} \quad (7)$$

Где  $P_{C1}$ ,  $P_{C2}$  и  $P_{C3}$  – работа компрессоров К1, К2 и К3 соответственно. Каждая из величин  $P_{C1}$ ,  $P_{C2}$  и  $P_{C3}$  является технической характеристикой используемого компрессора. Суммарная работа компрессии для данного типа используемого оборудования составляет 2530 кВт.

Принимая коэффициент функционирования электростанции равным 7446 ч/год, с учетом затрат времени на сезонный останов для проведения плановых ремонтно – восстановительных работ, а стоимость электроэнергии для данных условий 3,1 Р / кВт·ч (~ 0,04 \$ / кВт·ч) себестоимость выделения одной тонны гелия при использовании мембранной технологии составляет 2455 Р (~ 34 \$).

Предложенное компанией Криогенмаш техническое решение, основано на использовании малотоннажной установки, предназначенной для получения СПГ в количестве 4,3 т/ч с выделением около 19 нм<sup>3</sup>/ч гелиевого концентрата. В данном случае удельный расход энергии, необходимый для функционирования процесса получения СПГ, значителен и составляет 0,69 кВт-ч на 1 кг СПГ, а извлечение гелиевого концентрата - всего 11%. Себестоимость выделения одной тонны гелия при таких условиях будет составлять 7517,5 Р (~ 103 \$).

#### 4.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности технологии

Рассчитаем интегральный финансовый показатель по формуле:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}} = \frac{\Phi_{\text{pi}}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (8)$$

Где:

$I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}}$  – интегральный финансовый показатель технологии;

$\Phi_{\text{pi}}$  – стоимость i-го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения технологии.

Сравниваются две технологии выделения гелия из состава природного газа. Суммы затрат составляют: 330 348 000 рублей – затраты на использование мембранной технологии газоразделения, 962 378 000 рублей – затраты на использование криогенной установки Криогенмаш, 1 024 288 000 рублей – максимальное найденное значение затрат на реализацию криогенной технологии.

$$I_{\text{исп.1}} = \frac{3,3}{10,2} = 0,32, \quad (9)$$

$$I_{\text{исп.2}} = \frac{9,6}{10,2} = 0,94 \quad (10)$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{pi}} = \sum a_i \cdot b_i \quad (11)$$

Где:

$I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го вариант исполнения технологии;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения технологии;

$b_i$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения технологии.

Для расчета построим сравнительную оценку характеристик вариантов исполнения технологии в таблице 8.

Таблица 8 — Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения технологии

| Критерии \ Объект исследования           | Весовой коэффициент параметра | Исп. 1 | Исп. 2 |
|--|-------------------------------|--------|--------|
| 1. Способствует росту производительности | 0,2                           | 4      | 3      |
| 2. Удобство в эксплуатации               | 0,1                           | 4      | 2      |
| 3. Энергосбережение                      | 0,2                           | 3      | 2      |
| 4. Надежность                            | 0,2                           | 3      | 3      |
| 5. Материалоемкость                      | 0,3                           | 3      | 2      |
| ИТОГО                                    | 1                             |        |        |

$$I_{p-исп1} = 3,3.$$

$$I_{p-исп2} = 2,4;$$

Рассчитаем интегральный финансовый показатель по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп.1}}{I_{финр}^{исп.1}}, \quad (12)$$

$$I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп.2}}{I_{финр}^{исп.2}} \quad (13)$$

$$I_{исп.1} = 3,3/0,32 = 10,31.$$

$$I_{исп.2} = 2,4/0,94 = 2,55;$$

Сравнительная эффективность проекта вычисляется по формуле:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}} \quad (14)$$

$$\mathcal{E}_{ср} = 10,31/2,55 = 4,04.$$

Составим таблицу 9 сравнительной эффективности технологий.

Таблица 9 – Сравнительная эффективность технологии

| № | Показатели  | Исп. 1 | Исп. 2 |
|---|---|--------|--------|
| 1 | Интегральный финансовый показатель технологии           | 0,32   | 0,94   |
| 2 | Интегральный показатель ресурсоэффективности технологии | 3,3    | 2,4    |
| 3 | Интегральный показатель эффективности                   | 10,31  | 2,55   |

Исходя из результатов, приведенных в таблице, можно сделать вывод о том, что вариант использования мембранной технологии выделения гелия оказался наиболее эффективным по 2 двум из 3 рассмотренных показателей.

#### 4.5 SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта проведен SWOT-анализ. Он проводится в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Матрица SWOT-анализа

| Сильные стороны технологии (С)  | Слабые стороны технологии (Сл)  |
|---|---|
| 1. Применение мембранных технологий извлечения гелия позволяет производить требуемый уровень извлечения гелиевого концентрата без применения малоэффективных технологий, требующих больших временных затрат;<br>2. Технология является экономически более эффективной в сравнении с более ресурсоемким криогенным методом;<br>3. Использование технологии непосредственно на промысле позволяет сократить затраты на транспортировку гелиевого концентрата с ГПЗ на хранение в разрабатываемую залежь по специальному гелиепроводу. | 1. Большие капитальные затраты при необходимости получения товарного гелия как продукта;<br>2. Необходимость специальной очистки сырьевого газа от механических частиц. |
| <b>Возможности (В)</b>  | <b>Угрозы (У)</b>   |

|   |   |
|---|---|
| 1. Сокращение времени технологических операций по выделению гелия;<br>2. Увеличение прибыли с переработки газа путем уменьшения себестоимости добычи гелия мембранным способом. | 1. Изменение качества используемого сырья со временем, за счет чего возникновение необходимости для ввода установок предварительной очистки газа;<br>2. Развивающаяся конкуренция методов компонентного разделения природного газа. |
|---|---|

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Её использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Возможно использование этой матрицы в качестве одной из основ для оценки вариантов стратегического выбора.

Факторы помечаются либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Интерактивные матрицы проекта представлены в таблицах 11, 12, 13, 14.

Таблица 11 – Интерактивная матрица проекта

| Сильные стороны     |    |    |    |    |
|---------------------|----|----|----|----|
| Возможности проекта |    | C1 | C2 | C3 |
|                     | B1 | +  | 0  | +  |
|                     | B2 | 0  | +  | +  |

При анализе интерактивной таблицы 11 определены сильные коррелирующие стороны и возможности: B1C1C3; B2C2C3;

Таблица 12 – Интерактивная матрица проекта

| Слабые стороны      |    |     |     |
|---------------------|----|-----|-----|
| Возможности проекта |    | Сл1 | Сл2 |
|                     | B1 | -   | -   |
|                     | B2 | -   | +   |

При анализе интерактивной таблицы 12 обнаружены корреляции слабых сторон и возможностей проекта: B2Сл2.

Таблица 13 – Интерактивная матрица проекта

| <b>Сильные стороны</b> |    |    |    |    |
|------------------------|----|----|----|----|
| Угрозы проекта         |    | C1 | C2 | C3 |
|                        | У1 | 0  | -  | -  |
|                        | У2 | +  | +  | 0  |

При анализе интерактивной таблицы 13 выявлены корреляции сильных сторон и угроз проекта: У2С1С2.

Таблица 14 – Интерактивная матрица проекта

| <b>Слабые стороны</b> |    |     |     |
|-----------------------|----|-----|-----|
| Угрозы проекта        |    | Сл1 | Сл2 |
|                       | У1 | +   | +   |
|                       | У2 | 0   | 0   |

При анализе интерактивной таблицы 14 выявлены корреляции слабых сторон и угроз проекта: У1СЛ1СЛ2.

Рассматриваемая технология имеет большой потенциал к реализации в условиях месторождения, когда требуется произвести гелиевый концентрат либо для отправки на следующий этап очистки на газоперерабатывающий завод либо на долгосрочное хранение в разрабатываемую залежь. Однако при необходимости получения товарного гелия как основного продукта при помощи мембранной технологии необходимы большие капитальные затраты. Также необходимо производить специальную очистку сырьевого газа от механических частиц для обеспечения эффективной работы мембраны.

#### **4.6 Разработка графика анализа технологии**

В рамках планирования выпускной квалификационной работы необходимо построить календарный и сетевой графики проекта. Линейный график представлен в виде таблицы 15.

Таблица 15 – Календарный план выполнения работы

| Название   | Длительность, дни | Дата начала работ | Дата окончания работ | Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)            |
|--|-------------------|-------------------|----------------------|---|
| Ознакомление с темой работы                          | 4                 | 1.02.2021         | 4.02.2021            | Свинухов Б.В.   |
| Описание общей теоретической части по теме           | 13                | 5.02.2021         | 17.02.2021           | Свинухов Б.В.<br>Максимова Ю.А.<br>(научный руководитель ВКР) |
| Изучение нормативно – технической базы               | 14                | 18.02.2021        | 3.03.2021            | Свинухов Б.В.   |
| Изучение методов утилизации попутного нефтяного газа | 23                | 04.03.2021        | 26.03.2021           | Свинухов Б.В.<br>Максимова Ю.А.<br>(научный руководитель ВКР) |
| Финансовый менеджмент                                | 21                | 27.03.2021        | 16.04.2021           | Свинухов Б.В.   |
| Социальная ответственность                           | 19                | 17.04.2021        | 5.05.2021            | Свинухов Б.В.   |
| Заключение   | 22                | 06.05.2021        | 27.05.2021           | Свинухов Б.В.<br>Максимова Ю.А.<br>(научный руководитель ВКР) |
| Презентация  | 16                | 28.05.2021        | 12.06.2021           | Свинухов Б.В.   |

Для иллюстрации календарного плана проекта приведена диаграмма Ганта, на которой работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства отображения в таблице 16 каждый месяц разделен на декады.

Таблица 16 — Календарный план-график проведения анализа по теме

| Вид работ  | Исполнители             | Рабочие дни | Продолжительность работ |   |   |      |   |   |      |   |   |     |   |   |      |   |   |   |   |   |
|--|-------------------------|-------------|-------------------------|---|---|------|---|---|------|---|---|-----|---|---|------|---|---|---|---|---|
|  |                         |             | Фев.                    |   |   | Март |   |   | Апр. |   |   | Май |   |   | Июн. |   |   |   |   |   |
|  |                         |             | 1                       | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1   | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 |   |   |   |
| Ознакомление с темой работы                          | Студент                 | 4           | 1                       | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1   | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| Описание общей теоретической части по теме           | Студент<br>Руководитель | 13          | 1                       | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1   | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| Изучение нормативно – технической базы               | Студент                 | 14          | 1                       | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1   | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| Изучение методов утилизации попутного нефтяного газа | Студент<br>Руководитель | 23          | 1                       | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1   | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| Финансовый менеджмент                                | Студент                 | 21          | 1                       | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1   | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| Социальная ответственность                           | Студент                 | 19          | 1                       | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1   | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| Заключение   | Студент<br>Руководитель | 22          | 1                       | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1   | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| Презентация  | Студент                 | 16          | 1                       | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1   | 1 | 2 | 1    | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |

 - бакалавр;

 - руководитель.

#### 4.7 Вывод по экономическому разделу

В данном разделе была оценена технологическая и экономическая эффективность от применения технологии мембранного извлечения гелия из состава природного газа.

Внедрение такого проекта в условиях промысла позволило бы сократить затраты на производство гелиевого концентрата в три раза в сравнении с традиционной криогенной технологией. Использование мембран позволяет значительно снизить затраты энергоресурсов на процесс подготовки газа, уменьшить затраты на оборудование установки, а также уменьшить количество технологического персонала, необходимого для обслуживания установок подготовки газа.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

|               |                                 |
|---------------|---------------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                      |
| 2Б7П          | Свинухову Богдану Владимировичу |

|                            |  |                                  |   |
|----------------------------|--|----------------------------------|---|
| <b>Школа</b>               | <b>Инженерная школа природных ресурсов</b> | <b>Отделение (НОЦ)</b>           | <b>Отделение нефтегазового дела</b>   |
| <b>Уровень образования</b> | Бакалавриат                                | <b>Направление/специальность</b> | 21.03.01 «Нефтегазовое дело», профиль: «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» |

Тема ВКР:

|  |  |
|--|--|
| Анализ технологических параметров работы мембранных систем извлечения гелия из природного газа в процессе разработки газовых месторождений   |  |
| <b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>   |  |
| 1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения   | <p>Объект исследования: установки извлечения гелия из состава природного газа</p> <p>Область применения: переработка газа</p>  |
| Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:   |  |
| <p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul> | <p>- Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018) – ТК РФ – Глава 47. Особенности регулирования труда лиц, работающих вахтовым методом</p> <p>- ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования</p> <p>- ГОСТ 12.1.007-76 «ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности»</p>  |
| <p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>   | <p>Вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- отклонение показателей климата на открытом воздухе;</li> <li>- превышение уровней шума и вибрации;</li> <li>- повышенная запыленность рабочей зоны;</li> <li>- недостаточная освещенность.</li> </ul> <p>Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- опасные химические соединения в воздухе рабочей зоны;</li> <li>- высокое давление;</li> <li>- механические опасности.</li> </ul> |
| <p><b>3. Экологическая безопасность:</b></p>   | <p>Атмосфера: загрязнение атмосферного воздуха, выброс газа.</p>   |

|  |  |
|--|--|
|  | Гидросфера: загрязнение подземных вод.<br>Литосфера: загрязнение почвы химическими веществами.   |
| <b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b> | Возможные ЧС:<br>- разрушение элементов, находящихся под высоким давлением;<br>- нарушение электроснабжения;<br>- разрушение полимерных мембран, мембранных модулей<br>Наиболее типичная ЧС:<br>- разрушение элементов, находящихся под высоким давлением. |

|   |  |
|---|--|
| <b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b> |  |
|---|--|

**Задание выдал консультант:**

| Должность             | ФИО                  | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------------|----------------------|------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель | Фех Алина Ильдаровна | -                      |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                          | Подпись | Дата |
|--------|------------------------------|---------|------|
| 2Б7П   | Свиныхов Богдан Владимирович |         |      |

## 5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Безопасность сотрудников является наиболее важным критерием, на основании соблюдения которого предприятие или объект могут быть введены в эксплуатацию. Соблюдение безопасных условий труда необходимо для снижения воздействия опасных и вредных факторов на сотрудника.

Социальная ответственность представляет собой перечень правил и мероприятий, обязательным требованием к формированию которых является создание благоприятных условий труда и жизни работников.

Оборудование и установки по компонентному разделению природного газа являются неотъемлемой частью процесса добычи и переработки этого ископаемого топлива. Выделение гелия из состава природного газа одна из ключевых задач процесса переработки. С развитием технологий появилось множество различных способов производства гелия, базирующихся на применении природного газа. В настоящей работе рассмотрены наиболее современные и инновационные методы компонентного разделения природного газа. В настоящее время, применение мембранных систем извлечения гелия из состава природного газа в процессе разработки месторождений является наиболее эффективным решением для месторождений Восточной Сибири и дальнего Востока. В силу высокой гелиенасыщенности пластового флюида в данном районе и подходящих геологических условий возможно получение чистого гелия с последующей закачкой его в разрабатываемые залежи.

Сущность работ заключается в выполнении следующих технологических операций: получение сырья для переработки на установках мембранного разделения; отправка сырья по технологическим трубопроводам на установки мембранного разделения; разделение природного газа в мембранных модулях на компоненты, в том числе получение гелия; закачка полученного чистого гелия в разрабатываемую залежь с целью сохранения потенциально нереализуемых запасов этого стратегически важного не возобновляемого ресурса. Работы

выполняются круглогодично. Установка для мембранного разделения природного газа находится на территории разрабатываемого месторождения.

### **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Так как технология реализуется непосредственно на месторождении, то для сотрудников, выполняющих работы на оборудовании установки преобладает вахтовый метод работы. Это объясняется тем, что месторождения значительно удалены от места постоянного проживания работников или места нахождения работодателя. Особенности работы вахтовым методом прописаны в Главе 47 ТК РФ. К работам, выполняемым вахтовым методом, не могут привлекаться работники в возрасте до восемнадцати лет, беременные женщины и женщины, имеющие детей в возрасте до трех лет, а также лица, имеющие противопоказания к выполнению работ вахтовым методом в соответствии с медицинским заключением, выданным в порядке, установленном федеральными законами и иными нормативными правовыми актами Российской Федерации.[20]

Продолжительность вахты не должна превышать одного месяца. Однако при определенных обстоятельствах продолжительность может быть увеличена до трех месяцев. Период вахты включает в себя время выполнения работ и время междусменного отдыха.[20]

Лицам, выполняющим работы вахтовым методом, за каждый календарный день пребывания в местах производства работ в период вахты, а также за фактические дни нахождения в пути от места нахождения работодателя (пункта сбора) до места выполнения работы и обратно выплачивается взамен суточных надбавка за вахтовый метод работы.[20]

Рабочее время и время отдыха в пределах учетного периода регламентируется графиком работы на вахте, который утверждается работодателем. Большинство территорий Западной Сибири, Восточной Сибири и Дальнего Востока приурочены к районам Крайнего Севера. Для работников,

выполняющих работы вахтовым методом на местности, приравненных к районам Крайнего Севера предусмотрен ряд дополнительных льгот:

- выплачиваются процентные надбавки к заработной плате в порядке и размерах, которые предусмотрены для лиц, постоянно работающих в местностях, приравненным к районам Крайнего Севера. Процентные надбавки в Западной Сибири: по истечении первого года работы – 10%, за каждый последующий год работы – увеличение на 10% по достижению 50% заработка;
- предоставляется ежегодный дополнительный оплачиваемый отпуск в порядке и на условиях, которые предусмотрены для лиц, постоянно работающих: в местностях, приравненных к районам Крайнего Севера, - 16 календарных дней.[20]

## **5.2 Производственная безопасность**

Процесс газоразделения и получения конечного продукта происходит в мембранных модулях. Технологическая цепочка разделения газовых смесей кроме модулей включает компрессоры и системы предварительной подготовки исходной смеси. Контроль за работой системы осуществляется оператором, преимущественно дистанционно, с использованием специального оборудования, размещенного в операторной УМВГК. Его рабочее место включает: компьютерное устройство с установленным специальным программным комплексом. Контроль за работой установки требует планового осмотра и ревизии технологических узлов и агрегатов на местности, производства работ по устранению неполадок узлов и агрегатов, включенных в перечень обязанностей согласно трудовому договору.

Работая на производственных объектах, работник подвергается вредному воздействию опасных и вредных факторов. Классификация факторов представлена в нормативном документе – ГОСТ 12.0.003-2015 «Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [21] (таблица 17).

Таблица 17 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы при выполнении работ на кустовых площадках

| Факторы<br>(ГОСТ 12.0.003-2015)                          | Этапы работ                             |   |  | Нормативные документы  |
|--|---|---|--|--|
|  | Добыча и транспортировка исходного газа | Процесс мембранного выделения гелиевого концентрата | Транспортировка и закачка чистого гелия в разрабатываемую залежь |  |
| 1) Отклонение показателей климата на открытом воздухе;   | +                                       |   | +  | - ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [22]<br>- ГОСТ 12.1.003-2014 «ССБТ. |
| 2) Превышение уровней шума и вибрации;                   |   | +   | +  | Шум. Общие требования безопасности» [23];<br>- ГОСТ 12.1.012-90 «ССБТ. Вибрационная безопасность.                              |
| 3) Повышенная запыленность рабочей зоны;                 | +                                       | +   | +  | Общие требования» [24];<br>- СП 52.13330.2016 «Естественное и  |
| 4) Недостаточная освещенность;                           | +                                       | +   | +  | искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*» [25];<br>- ГОСТ 12.2.003-91 «ССБТ.                         |
| 5) Опасные химические соединения в воздухе рабочей зоны; |   | +   | +  | Оборудование производственное. Общие требования безопасности» [26];  |
| 6) Высокое давление;                                     |   | +   | +  | - ГОСТ 12.1.007-76 «ССБТ. Вредные вещества.  |
| 7) Механические опасности.                               | +                                       | +   | +  | Классификация и общие требования безопасности» [27].   |

### 5.3 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровня воздействия

#### Отклонение показателей климата на открытом воздухе

Работа технологического оборудования установки организована на открытом воздухе. Неблагоприятные метеорологические условия, такие как:

экстремально высокая или низкая температура окружающей среды, неблагоприятная скорость ветра, крайне высокая или низкая влажность воздуха могут негативно сказаться на производственном процессе и привести к несчастному случаю. При определенной температуре воздуха и скорости ветра в холодное время работы приостанавливаются (таблица 15).

Таблица 18 – Погодные условия, при которых работы на открытом воздухе приостанавливаются

| <b>Скорость ветра, м/с</b> | <b>Температура воздуха, °С</b> |
|----------------------------|--------------------------------|
| Безветренная погода        | -40                            |
| Менее 5,0                  | -35                            |
| 5,1 – 10,0                 | -25                            |
| 10,1 – 15,0                | -15                            |
| 15,1 – 20,0                | -5                             |
| Более 20,0                 | 0                              |

При высокой температуре наблюдается снижение концентрации внимания, вследствие этого появляются неосмотрительность и торопливость, при низкой температуре происходит интенсивная теплоотдача организма, что также негативным образом влияет на рабочий процесс. Если влажность воздуха находится в диапазоне 35-70% воздух считается влажным, если меньше данного диапазона – сухой. Сухой воздух влечет за собой повышенное испарение, которое приводит к ощущению сухости слизистых оболочек и кожи. В свою очередь, влажный воздух осложняет испарение.

При отклонении показателей климата предусмотрены средства индивидуальной защиты. СИЗ призваны предотвратить или уменьшить риск воздействия опасных и вредных производственных факторов. Они выбираются согласно ГОСТ 12.4.011-89 «ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация». Для защиты головы от теплового облучения

используются алюминиевые, фибровые каски. Также каска поможет избежать травм головы. Для исключения попадания песка в глаза или в носовую полость необходимо применять очки и респираторы. Работа с оборудованием технологической установки необходимо осуществлять в перчатках или рукавицах, которые также в холодный период года помогут избежать обморожения рук. Защитой от пониженной температуры служит теплая спецодежда, а при осадках – плащи. Также в рабочей зоне предусмотрены помещения для обогрева сотрудников в холодное время года.

Согласно ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» на пультах и постах управления технологическими процессами, в залах вычислительной техники и других производственных помещениях при выполнении работ операторского типа, связанных с нервно-эмоциональным напряжением, должны соблюдаться оптимальные величины температуры воздуха 22-24°C, его относительной влажности 60-40% и скорости движения (не более 0,1 м/с).

### **Превышение уровней шума и вибрации**

Работа и обслуживание технологических агрегатов установки сопровождается определенным воздействием шума рабочей зоны. Согласно ГОСТ 12.1.003-2014 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности» значение уровня звука в помещении на рабочем месте не должен превышать 40-45 дБ, а на открытой местности – не более 80 дБ. Для снижения уровня шума работникам следует применять СИЗ.

Из-за удаленности месторождений от места проживания работников их доставляют на промысел на вертолетах. Они создают уровень шума 95-100 дБ, что превышает норму. Поэтому необходимо выбрать средства защиты согласно СП 51.13330.2011 «Свод правил. Защита от шума»: противοшумные вкладыши или наушники.

Технологическая норма уровня вибрации составляет 92 дБ согласно ГОСТ 12.1.012-90 «ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования». При

значении уровня вибрации 92дБ частота составляет 63 Гц. Уровень вибрации на открытой местности рабочего места оператора технологической установки объясняется работой технологических узлов установки мембранного выделения гелия. При работе с оборудованием, находящимся под воздействием вибрации производительность работника снижается, а также растет число травм. Для защиты от вибрации рекомендуется применять резиновые перчатки.

### **Повышенная запыленность рабочей зоны**

Эксплуатация установки ведется в пределах установленного периметра, обозначенного насыпной песчаной обваловкой. При чем территория, на которой располагается технологическая установка в основании имеет большое количество песка и глинистого материала. Под воздействием сильного ветра образуется повышенная запыленность рабочей зоны и твердые механические частицы способны попасть в носовую полость, глаза рабочего. Чтобы предотвратить попадание песка необходимо использовать средства защиты органов дыхания и средства защиты глаз рабочего.

### **Недостаточная освещенность**

Часто приходится работать в темное время суток и необходимо обеспечить достаточную освещенность зоны работ. Норма освещенности должна быть не ниже 10 люксов согласно СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*». Если норма освещенности соответствует нужному диапазону, как правило в дневное время, то мероприятия по улучшению освещенности не требуется.

## **5.4 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровня воздействия**

### **Опасные химические соединения в воздухе рабочей зоны**

При работе УМВГК наблюдается существенное увеличение концентрации опасных химических соединений в воздухе рабочей зоны. Нарушение герметизации узлов и агрегатов, входящих в состав технологической цепочки, может привести к утечке опасных химических соединений в атмосферу.

Нахождение в зоне с превышенной предельно допустимой концентрацией вредных веществ в воздухе рабочей зоны способно привести к раздражению дыхательных путей и кожи, раздражению слизистой оболочки глаз, а в отдельных случаях удушью и смерти рабочего. Поэтому необходимо соблюдать меры предосторожности при работах в зоне расположения агрегатов и технологических узлов. Также необходимо тщательно производить анализ газовоздушной среды поверенным газоанализатором. Значения предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны представлены в ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».

### **Высокое давление**

Аппараты, работающие под давлением – оборудование, в котором жидкость или газ находятся под давлением, превышающем атмосферное. В технологической цепочке установки мембранного выделения гелиевого концентрата для обеспечения правильной работы оборудования используются дожимной и межступенчатый компрессоры. Чтобы не допустить чрезвычайных ситуаций разработаны Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «НП-044-18 Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под избыточным давлением, для объектов использования атомной энергии», утверждённые Приказом Ростехнадзора №93 от 02.03.2018 г.

Нарушение герметичности оборудования может произойти при взрыве сосуда, работающего под избыточным давлением. При взрыве может произойти разрушение взрывной волной близкорасположенного оборудования, а также нанесение травм работнику, в том числе не совместимых с жизнью.

Также нарушение герметичности может быть вызвано дефектами, такими как: трещины, вмятины, полученные при изготовлении, хранении и транспортировке сосудов, работающих под давлением. Для обнаружения дефектов необходим ежедневный внешний осмотр оборудования, проведение дефектоскопии с использованием специализированного оборудования и средств

измерений КИП, а также испытания сосудов и материалов, из которых они изготовлены.

### **Механические опасности**

Работа технологической установки осуществляется с применением оборудования, имеющего вращающиеся части, а также оборудования, находящегося под высокими температурными перегрузками. Поэтому очень важно использовать кожухи и заградительные ограждения, чтобы исключить вероятность соприкосновения человека с потенциально опасным механизмом.

Необходимо систематически проверять целостность защитных ограждений, наличие защитных кожухов, проводить плановую и внеплановую проверку пусковых и тормозных устройств, а также проверку состояния оборудования согласно ГОСТ 12.2.003-91 «ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности». Также необходимо соблюдать технику безопасности и использовать средства индивидуальной защиты.

### **5.5 Экологическая безопасность**

Работа технологической установки мембранного выделения гелиевого концентрата оказывает техногенное воздействие на окружающую среду. В первую очередь это попадание вредных и опасных веществ в атмосферу. Для минимизации вредного воздействия необходимо применять комплекс мероприятий по охране окружающей среды.

#### **Защита атмосферы**

Атмосферный воздух может загрязняться вследствие выброса компонентов газа и сопутствующих вредных веществ. Предельно допустимые концентрации вредных веществ устанавливаются согласно ГН 2.2.5.3532–18. «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны». Мероприятиями по охране атмосферы являются поддержание герметичности системы технологических трубопроводов, агрегатов и узлов

установки и контроль за воздушной средой на территории УМВГК для определения опасной концентрации газа.

### **Защита гидросферы**

Закачка конечного продукта в разрабатываемую залежь приводит к увеличению концентрации гелия в пласте, что негативно воздействует на пластовые воды и в целом на гидросферу. Это происходит вследствие того, что гелий является летучим газом, способным проникать сквозь поры и трещины породы и накапливаться в пластовых водах. Согласно ГОСТ 17.1.3.06-82. «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране подземных вод.» при загрязнении или опасности загрязнения подземных вод объем и способ наблюдений за их режимом или качеством определяется в зависимости от значения и вида их использования, а также с учетом возможных последствий их загрязнения.

### **Защита литосферы**

Добыча исходного газа и закачка чистого гелия в разрабатываемую залежь сопровождается повышенным риском загрязнения литосферы опасными и вредными веществами. Также в процессе переработки природного газа и выделения из его состава отдельных компонентов, включая гелий, пагубное влияние оказывается на прилегающие к территории технологической установки почвы. Основными критериями, используемыми для оценки степени загрязнения почв, согласно ГОСТ 17.4.3.04-85 «Охрана природы (ССОП). Почвы. Общие требования к контролю и охране от загрязнения» должны быть предельно допустимые количества (ПДК) и ориентировочные допустимые количества (ОДК) химических веществ в почве по ГОСТ 27593-88, нормативы допустимых количеств загрязняющих веществ в смежных природных средах и в сельскохозяйственной продукции, показатели санитарного состояния почв по ГОСТ 17.4.2.01-81. Необходимо проводить мониторинг степени загрязнения почв, рекультивацию прилегающих земель, осуществлять утилизацию и

захоронение выбросов, сбросов, отходов, стоков и осадков сточных вод с соблюдением мер по предотвращению загрязнения почв

## **5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Чрезвычайные ситуации (ЧС), которые могут возникнуть в процессе работы установки мембранного выделения гелиевого концентрата:

- разрушение элементов, в которых содержатся или по которым транспортируются жидкости и газы, находящиеся под высоким давлением;
- нарушение электроснабжения или полное отключение подачи электроэнергии;
- разрушение полимерных мембран, мембранных модулей.

Наибольшую опасность для работников представляют собой процессы, идущие под высоким давлением. При этом существует вероятность нарушение герметичности оборудования, и, как следствие, может произойти взрыв. В результате работник может получить травмы, в том числе не совместимые с жизнью.

В случае возникновения ЧС необходимо оградить опасную зону, сообщить о ситуации руководству и начать мероприятия по спасению людей, если есть пострадавшие. Действия при ЧС регламентированы инструкцией, с которой должен быть ознакомлен каждый сотрудник. ГОСТ Р 22.0.07-95. «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники техногенных чрезвычайных ситуаций. Классификация и номенклатура поражающих факторов и их параметров» устанавливает перечень поражающих факторов, а также обозначение и размерность контролируемых параметров поражающих факторов, используемых для прогнозирования.

Основные мероприятия по предотвращению опасностей, обусловленных повышением давления и нагрузками, включают в себя: осмотр и испытание установок, оборудования, механизмов; применение различных средств блокировки, исключающих аварии при неправильных действиях рабочих;

автоматизация производственных процессов, позволяющая вывести людей из опасных зон, и осуществлять контроль показаний приборов дистанционно.

### **Вывод по разделу «Социальная ответственность»**

В данном разделе были проанализированы вредные и опасные факторы, влияющие на здоровье работников. Выполнение мер безопасности и мер по предупреждению опасных факторов позволит избежать наступления ЧС и сократить вредное воздействие на работников предприятия. Работа установки мембранного выделения гелиевого концентрата оказывает техногенное воздействие на окружающую среду, поэтому необходимо применять меры по снижению этого воздействия на основании нормативных документов.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были проанализированы современные технологии выделения гелия из состава природного газа, даны рекомендации к выбору наиболее коммерчески эффективного метода в условиях месторождения.

Технологии выделения гелия из состава природного газа необходимы для производства и сохранения потенциально не реализуемых объемов этого стратегически важного, невозобновляемого ресурса. В условиях, когда газ месторождения является гелиенасыщенным, с высоким содержанием гелия, транспортировка его на ГПЗ с целью дальнейшей переработки и выделения из состава необходимых компонентов, включая гелий, оказывается невыгодной. Это связано с дальнейшими трудностями в хранении больших объемов гелия.

В настоящий момент рынок не нуждается в тех объемах товарного гелия, которые может генерировать отрасль. В связи с этим существует необходимость долгосрочного хранения больших объемов гелия, при чем целесообразно организовывать его путем закачки гелиевого концентрата обратно в разрабатываемую залежь. Это обусловлено наличием наиболее подходящих условий, в которых происходила аккумуляция этого газа. Транспортировка гелия, полученного на ГПЗ до места хранения является дорогостоящей процедурой, так как необходимо строительство специального трубопровода, по которому газ с ГПЗ поступал бы на хранение в разрабатываемую залежь.

В этих условиях целесообразно организовывать выделение основных объемов гелия непосредственно на промысле. Однако строительство сложных крупномасштабных установок криогенного разделения природного газа коммерчески не оправдано. Также, получаемый в ходе применения криогенной технологии, СПГ в данном случае не является целевым продуктом и для дальнейшей транспортировки и переработки на ГПЗ должен быть нагрет и переведен в состояние газа. Что также требует введения дополнительных технологий и затрат на их реализацию.

В свою очередь применение мембранных систем позволяет обеспечить необходимый уровень извлечения гелия из состава природного газа непосредственно на промысле без проектирования крупных и технически сложно реализуемых криогенных систем. Модульная компоновка дает возможность проектировать системы двухступенчатой и трехступенчатой мембранной очистки сырья. Использование технологии мембранного разделения газа с целью получения гелиевого концентрата и последующей закачки в разрабатываемую залежь является наиболее коммерчески эффективным решением, в силу относительно простого исполнения и меньших, в сравнении с криогенной технологией, энергозатрат.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ю. Евдошенко Корпоративный журнал Газпром, Советский гелий, 2011. №10. С. 54-56.
2. Фастовский В.Г., Новинский А.Е., Петровский Ю.В. Инертные газы. Издательство: М.: Атом-издат.. 1972. 352 с.
3. Якуцени В. П. Геология гелия. Л.: Недра. 1968. 232 с.
4. ГОСТ 949-73 Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на  $P(p) \leq 19,6$  МПа (200 кгс/кв. см). Технические условия (с Изменениями N 1-5)
5. А.А. Франчук, С.Б. Коротков, Е.В. Семёнова Геолого-геофизические характеристики солесодержащих флюидоупоров Сибирской платформы // Научно-технический сборник ВЕСТИ ГАЗОВОЙ НАУКИ. 2017. №3(31). С. 162-171.
6. Тихомиров В.В., Махмудов А.Х., Якуцени В.П. О характере взаимосвязи между запасами гелия, азота и углеводородов в свободных газовых залежах. - Геология нефти и газа, 1973, № 2 , с. 17-21.
7. ГОСТ Р 56676-2015 «Проектирование разработки и освоение газовых и газоконденсатных месторождений. Подсчет запасов газа и газового конденсата объемным методом. Основные технические требования»
8. ГОСТ Р 57413-2017 «Газ горючий природный. Государственные стандартные образцы на основе магистрального газа. Технические условия»
9. И.А. Голубева, Е.В. Родина, В.В. Можейкина Газоперерабатывающие предприятия россии. Оренбургский ГПК — газоперерабатывающий и гелиевый заводы (ООО «Газпром добыча Оренбург») Нефтепереработка и нефтехимия. № 2. 2015. с. 31-44
10. ГОСТ Р 53521-2009 «Переработка природного газа. Термины и определения»
11. ТУ 0271-135-31323949-2005 «Гелий газообразный (сжатый)»

12. А. В. Ильдяков, Э.Г. Ларионов, А.Ю. Манаков, В. М. Фомин Газогидратный метод обогащения природного газа гелием с использованием «сухой воды». Научный журнал «Газохимия». 2011. С. 28-32
13. Сайт: <http://gazprominfo.ru/terms/> - Самоконсервация газовых гидратов
14. Т. С. Казарян, А. Д. Седых, Ф. Г. Гайнуллин, А. И. Шевченко Мембранная технология в решении экологических проблем газовой промышленности — Москва: Недра, 1997. — 227 с.
15. База данных Федеральной службы по интеллектуальной собственности «Роспатент». Патент на полезную модель - RU №109989 от 10.11.2011 – «Установка для осушки природного газа»
16. База данных Федеральной службы по интеллектуальной собственности «Роспатент». Патент на полезную модель – RU №114423 от 27.03.2012 – «Установка очистки природного газа высокого давления от гелия»
17. База данных Федеральной службы по интеллектуальной собственности «Роспатент». Патент на полезную модель – RU №103744 от 27.04.2011
18. База данных Федеральной службы по интеллектуальной собственности «Роспатент». Патент на полезную модель – RU №103744 от 27.04.2011
19. База данных Федеральной службы по интеллектуальной собственности «Роспатент». Патент на полезную модель – патент - US20040020123A1– «Устройство и способ обезвоживания шламов газовых гидратов»
20. Трудовой кодекс Российской Федерации. Глава 47
21. ГОСТ 12.0.003-2015 «Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация»
22. ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [22]

23. ГОСТ 12.1.003-2014 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности»
24. ГОСТ 12.1.012-90 «ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования»
25. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*
26. ГОСТ 12.2.003-91 «ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности»
27. ГОСТ 12.1.007-76 «ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности»
28. ИТС 50-2017 «Переработка природного и попутного газа»

## Приложение А

Таблица 19 - Основные параметры и размеры баллонов для транспортировки и хранения гелия

| Объем баллона, л | Диаметр цилиндрической части | Толщина стенки баллонов на давление, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ), не менее |           |           |                       |           | Длина корпуса баллонов на давление, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ) |           |           |                       |           | Масса баллонов на давление МПа (кгс/см <sup>2</sup> ), кг |           |           |                       |           |
|------------------|------------------------------|---|-----------|-----------|-----------------------|-----------|--|-----------|-----------|-----------------------|-----------|---|-----------|-----------|-----------------------|-----------|
|                  |                              | из углеродистой стали   |           |           | из легированной стали |           | из углеродистой стали  |           |           | из легированной стали |           | из углеродистой стали                                     |           |           | из легированной стали |           |
|                  |                              | 9,8(100)  | 14,7(150) | 19,6(200) | 14,7(150)             | 19,6(200) | 9,8(100)   | 14,7(150) | 19,6(200) | 14,7(150)             | 19,6(200) | 9,8(100)  | 14,7(150) | 19,6(200) | 14,7(150)             | 19,6(200) |
| 0,4              | 70                           | 1,6   | 2,2       | 2,9       | 1,6                   | 1,9       | 165  | 170       | 175       | 165                   | 165       | 0,6   | 0,8       | 1,0       | 0,6                   | 0,7       |
| 0,7              |                              |   |           |           |                       |           | 255  | 260       | 270       | 255                   | 255       | 0,9   | 1,2       | 1,5       | 0,9                   | 1,0       |
| 1,0              | 89                           | 1,9   | 2,8       | 3,6       | 1,9                   | 2,5       | 240  | 250       | 255       | 240                   | 245       | 1,2   | 1,8       | 2,4       | 1,2                   | 1,6       |
| 1,3              |                              |   |           |           |                       |           | 295  | 305       | 315       | 295                   | 300       | 1,5   | 2,2       | 2,8       | 1,5                   | 1,9       |
| 2,0              |                              |   |           |           |                       |           | 425  | 440       | 455       | 425                   | 435       | 2,1   | 3,1       | 4,0       | 2,1                   | 2,7       |
| 2,0              | 108                          | 2,4   | 3,4       | 4,4       | 2,4                   | 3,0       | 320  | 330       | 340       | 320                   | 325       | 2,5   | 3,7       | 4,7       | 2,5                   | 3,1       |
| 3,0              |                              |   |           |           |                       |           | 445  | 460       | 480       | 445                   | 455       | 3,4   | 5,0       | 6,4       | 3,4                   | 4,3       |
| 3,0              | 140                          | 3,1   | 4,4       | 5,7       | 3,1                   | 3,9       | 310  | 325       | 335       | 310                   | 320       | 4,1   | 6,0       | 7,9       | 4,1                   | 5,3       |
| 4,0              |                              |   |           |           |                       |           | 385  | 400       | 415       | 385                   | 395       | 5,0   | 7,3       | 9,6       | 5,0                   | 6,5       |
| 5,0              |                              |   |           |           |                       |           | 460  | 475       | 495       | 460                   | 470       | 5,8   | 8,5       | 11,4      | 5,8                   | 7,6       |
| 6,0              |                              |   |           |           |                       |           | 535  | 555       | 575       | 535                   | 550       | 6,7   | 9,8       | 13,1      | 6,7                   | 8,8       |
| 7,0              |                              |   |           |           |                       |           | 610  | 630       | 660       | 610                   | 625       | 7,6   | 11,1      | 14,9      | 7,6                   | 9,9       |
| 8,0              |                              |   |           |           |                       |           | 680  | 710       | 740       | 680                   | 700       | 8,5   | 12,4      | 16,6      | 8,5                   | 11,1      |
| 10,0             |                              |   |           |           |                       |           | 830  | 865       | 900       | 830                   | 850       | 10,2  | 15,0      | 20,1      | 10,2                  | 13,4      |
| 12,0             | 975                          | 1020  | 1060      | 975       | 1005                  | 11,9      | 17,6   | 23,5      | 11,9      | 15,6                  |           |   |           |           |                       |           |
| 20,0             | 219                          | 5,2   | 6,8       | 8,9       | 5,2                   | 6,0       | 730  | 740       | 770       | 730                   |           | 28,5  | 32,3      | 42,0      | 28,5                  |           |
| 25,0             |                              |   |           |           |                       |           | 890  | 900       | 935       | 890                   |           | 34,0  | 38,7      | 50,5      | 34,0                  |           |
| 32,0             |                              |   |           |           |                       |           | 1105   | 1120      | 1165      | 1105                  |           | 42,0  | 47,7      | 62,5      | 42,0                  |           |
| 40,0             |                              |   |           |           |                       |           | 1350   | 1370      | 1430      | 1350                  |           | 51,5  | 58,5      | 76,5      | 51,5                  |           |
| 50,0             | 1660                         | 1685  | 1755      | 1660      |                       | 62,5      | 71,3   | 93,0      | 62,5      |                       |           |   |           |           |                       |           |