

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

Факультет инженерно-физический  
Кафедра химии и химической технологии  
Направление подготовки 18.03.01 – Химическая технология  
Направленность (профиль) образовательной программы Химическая техноло-  
гия природных энергоносителей и углеродных материалов

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ**  
Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ Ю.А. Гужель  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Повышение энергоэффективности процесса криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа на Амурском ГПЗ

Исполнитель

студент группы 918-об

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Н.Е. Холодная

Руководитель

доцент, канд. техн. наук

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Ю.А. Гужель

Консультант по безопасности  
жизнедеятельности

доцент, канд. техн. наук

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль

проф., док. хим. наук

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

Т.А. Родина

Благовещенск 2023

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

Факультет Инженерно-физический  
Кафедра Химии и химической технологии

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_ Ю.А. Гужель  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

### **ЗАДАНИЕ**

К выпускной квалификационной работе студента Холодной Надежды Евгеньевны

1. Тема выпускной квалификационной работы: «Повышение энергоэффективности процесса криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа на Амурском ГПЗ» утверждена Приказом от 20.04.2023 г № 951-уч

2. Срок сдачи студентом законченной работы 09.06.2023 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: Содержание гелия в сырьевом газе – 0,4 % мол., содержание гелия в пермеате – 6,59 % мол. Производительность установки по сырью – 668000 кг/ч. Температура сырьевого газа – 13 °С, давление сырьевого газа – 7,25 МПа. Литературные данные. Технологическая документация, нормативная и иная документация

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): Литературный обзор по методам разделения природного газа. Описание способов повышения энергоэффективности процессов разделения природного газа. Характеристика сырья и готовой продукции установки. Описание технологической схемы установки. Описание способов модернизации. Экономическое обоснование предлагаемых технологических решений. Безопасность и экологичность производства.

5. Перечень материалов графической части: Технологическая схема установки криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси.

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе Козырь А.В., канд. техн. наук, доцент – раздел «Безопасность и экологичность производства».

7. Дата выдачи задания 25.04.2023 г.

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

Задание принял к исполнению 25.04.2023 г. \_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 82 с., 24 рисунка, 19 таблиц, 22 формулы, 51 литературный источник

### ПРИРОДНЫЙ ГАЗ, ЭТАН, ГЕЛИЙ, ШИРОКАЯ ФРАКЦИЯ ЛЕГКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ, НИЗКОТЕМПЕТАРУНЫЕ ПРОЦЕССЫ, МЕМБРАНЫ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, МОДЕРНИЗАЦИЯ, ДРОССЕЛЬ

В работе выполнен подбор и анализ литературы по теме низкотемпературные процессы разделения природного газа. Изучены различные варианты низкотемпературных процессов и основные факторы, влияющие на протекание процесса. Рассмотрено понятие об энергоэффективности данного технологического процесса и основные методы для ее повышения.

В технологической части приведены модернизации по повышению энергоэффективности процесса криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа на Амурском ГПЗ. С помощью специального программного обеспечения выполнено моделирование базового и модернизированных вариантов, рассчитаны основные параметры для мембранного модуля. Для подтверждения экономической эффективности выполнен технико-экономический расчет модернизации.

Охарактеризованы основные способы воздействия установки на окружающую среду и основные мероприятия для их предотвращения. Рассмотрены средства и системы защиты для работников при эксплуатации установки.

В графической части выполнен чертеж технологической схемы установки.

|                  |             |                      |                |             |  |                            |             |               |
|------------------|-------------|----------------------|----------------|-------------|--|----------------------------|-------------|---------------|
|                  |             |                      |                |             | <i>ВКР.19234.1.180301.ПЗ</i>   |                            |             |               |
| <i>Изм.</i>      | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i>      | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  |                            |             |               |
| <i>Разраб.</i>   |             | <i>Холодная Н.Е.</i> |                |             | <i>Повышение энергоэффективности процесса криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа на Амурском ГПЗ</i> | <i>Лит.</i>                | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> |
| <i>Провер.</i>   |             | <i>Гужель Ю.А.</i>   |                |             |  | <i>У</i>                   | <i>З</i>    | <i>82</i>     |
| <i>Реценз.</i>   |             |                      |                |             |  | <i>АМГУ ИФФ 918-об гр.</i> |             |               |
| <i>Н. Контр.</i> |             | <i>Родина Т.А.</i>   |                |             |  |                            |             |               |
| <i>Утверд.</i>   |             | <i>Гужель Ю.А.</i>   |                |             |  |                            |             |               |

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |  |    |
|---|--|----|
| Введение  |  | 6  |
| 1 Литературный обзор  |  | 7  |
| 1.1 Методы разделения природного газа   |  | 7  |
| 1.1.1 Низкотемпературная абсорбция  |  | 8  |
| 1.1.2 Низкотемпературная конденсация  |  | 9  |
| 1.1.3 Низкотемпературная ректификация   |  | 11 |
| 1.1.4 Низкотемпературная адсорбция  |  | 12 |
| 1.1.5 Мембранный способ разделения  |  | 15 |
| 1.2 Способы выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси                                     |  | 16 |
| 1.2.1 Выделение этана и ШФЛУ  |  | 16 |
| 1.2.2 Выделение гелия   |  | 19 |
| 1.3 Повышение энергоэффективности   |  | 25 |
| 1.3.1 Совершенствование процесса выделения этана и ШФЛУ                                       |  | 26 |
| 1.3.2 Совершенствование процесса выделения азотно-гелиевой смеси                              |  | 31 |
| 2 Технологическая часть   |  | 34 |
| 2.1 Характеристика сырья и готовой продукции  |  | 34 |
| 2.2 Описание технологической схемы  |  | 39 |
| 2.3 Модернизация установки выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси                      |  | 45 |
| 2.3.1 Внедрение мембранного модуля на установке выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси |  | 46 |
| 2.3.2 Внедрение мембранного модуля после колонны деметанизации                                |  | 48 |

|           |               |          |         |      |   |                     |      |        |
|-----------|---------------|----------|---------|------|---|---------------------|------|--------|
|           |               |          |         |      | <i>ВКР.19234.1.180301.ПЗ</i>  |                     |      |        |
| Изм.      | Лист          | № докум. | Подпись | Дата | Повышение энергоэффективности процесса криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа на Амурском ГПЗ | Лит.                | Лист | Листов |
| Разраб.   | Холодная Н.Е. |          |         |      |   | У                   | 4    | 82     |
| Провер.   | Гужель Ю.А.   |          |         |      |   | АмГУ ИФФ 918-об гр. |      |        |
| Реценз.   |               |          |         |      |   |                     |      |        |
| Н. Контр. | Родина Т.А.   |          |         |      |   |                     |      |        |
| Утверд.   | Гужель Ю.А.   |          |         |      |   |                     |      |        |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.3.3 | Технико-экономическое обоснование модернизации  | 52 |
| 2.4   | Моделирование и расчет установки выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси из природного газа                             | 59 |
| 2.5   | Модернизация способа охлаждения газа  | 65 |
| 2.6   | Моделирование и расчет модернизированного варианта установки выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси из природного газа | 67 |
| 3     | Безопасность и экологичность производства   | 71 |
| 3.1   | Воздействие на окружающую среду установки выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси                                       | 71 |
| 3.2   | Средства и системы защиты при эксплуатации установки  | 72 |
|       | Заключение  | 75 |
|       | Библиографический список  | 76 |

## ВВЕДЕНИЕ

Газопереработка – это отрасль промышленности, охватывающая переработку природного и попутного нефтяного газа. На газоперерабатывающих заводах путем различных низкотемпературных процессов из природного газа выделяют такие ценные компоненты, как метан, этан, широкую фракцию легких углеводородов (далее ШФЛУ), гелий [1].

Целью выпускной квалификационной работы является изучение процесса криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа для разработки способов по повышению энергоэффективности процесса.

Исходя из поставленной цели, были поставлены следующие задачи:

- 1) проанализировать техническую документацию, научную литературу по низкотемпературным методам разделения природного газа;
- 2) подробно изучить характеристику сырья и готовой продукции, а также технологическую схему выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа на Амурском ГПЗ;
- 3) разработать способы повышения энергоэффективности процесса;
- 4) выполнить моделирование и расчет базовой и усовершенствованной схемы с применением специального программного обеспечения, выполнить технико-экономический расчет;
- 5) рассмотреть основные факторы воздействия процесса на окружающую среду, а также средства и системы защиты работников;
- 6) выполнить графическое изображение установки в виде чертежа технологической схемы.

|                  |             |                      |                |             |  |                            |             |               |
|------------------|-------------|----------------------|----------------|-------------|--|----------------------------|-------------|---------------|
|                  |             |                      |                |             | <i>ВКР.19234.1.180301.ПЗ</i>   |                            |             |               |
| <i>Изм.</i>      | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i>      | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | <i>Повышение энергоэффективности процесса криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа на Амурском ГПЗ</i> | <i>Лит.</i>                | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> |
| <i>Разраб.</i>   |             | <i>Холодная Н.Е.</i> |                |             |  | <i>У</i>                   | <i>6</i>    | <i>82</i>     |
| <i>Провер.</i>   |             | <i>Гужель Ю.А.</i>   |                |             |  | <i>АМГУ ИФФ 918-об гр.</i> |             |               |
| <i>Реценз.</i>   |             |                      |                |             |  |                            |             |               |
| <i>Н. Контр.</i> |             | <i>Родина Т.А.</i>   |                |             |  |                            |             |               |
| <i>Утверд.</i>   |             | <i>Гужель Ю.А.</i>   |                |             |  |                            |             |               |

# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Методы разделения природного газа

Природный газ – это смесь, состоящая из углеводородов различного строения, азота, гелия, углекислого газа, сероводорода. Природный газ играет основную роль в энергетическом балансе мира [2].

Основным компонентом природного газа является метан, его содержание может варьироваться от 80 % до 98 %, такой газ называется «сухим». Этан, который содержится в природном газе в больших количествах, используется как сырье для процесса пиролиза, с дальнейшим производством различных продуктов, которые востребованы на рынке [3].

Широкая фракция легких углеводородов, выделяемая из природного газа, которая содержит помимо метана и этана жирный газ ( $C_3$ ,  $n-C_4$ ,  $i-C_4$ ) и нестабильный газовый бензин ( $C_5$ ,  $i-C_5$ ,  $C_6$ ,  $C_7$ ) имеет большое значение в газохимической и нефтехимической отрасли [4].

Помимо углеводородных компонентов, содержащихся в природном газе, значимую роль играет гелий. Благодаря своим необычным и ценным свойствам с каждым годом увеличивается количество отраслей, где его применение необходимо.

В связи с этим извлечение таких ценных компонентов из природного газа остается востребованным на протяжении многих лет. Разрабатываются новые технологии по переработке газа, с выделением различного ассортимента продукции [5].

В газоперерабатывающей промышленности для разделения природного газа используют следующие методы:

– низкотемпературная ректификация (НТР);

|                  |             |                      |                |             |  |                            |             |               |
|------------------|-------------|----------------------|----------------|-------------|--|----------------------------|-------------|---------------|
|                  |             |                      |                |             | <i>ВКР.19234.1.180301.ПЗ</i>   |                            |             |               |
| <i>Изм.</i>      | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i>      | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  |                            |             |               |
| <i>Разраб.</i>   |             | <i>Холодная Н.Е.</i> |                |             | <i>Повышение энергоэффективности процесса криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа на Амурском ГПЗ</i> | <i>Лит.</i>                | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> |
| <i>Провер.</i>   |             | <i>Гужель Ю.А.</i>   |                |             |  | <i>У</i>                   | <i>7</i>    | <i>82</i>     |
| <i>Реценз.</i>   |             |                      |                |             |  | <i>АмГУ ИФФ 918-об гр.</i> |             |               |
| <i>Н. Контр.</i> |             | <i>Родина Т.А.</i>   |                |             |  |                            |             |               |
| <i>Утверд.</i>   |             | <i>Гужель Ю.А.</i>   |                |             |  |                            |             |               |

- низкотемпературная конденсация (НТК);
- низкотемпературная абсорбция (НТА);
- низкотемпературная адсорбция (НТ-адсорбция);
- мембранный метод.

### 1.1.1 Низкотемпературная абсорбция

Низкотемпературная абсорбция – это процесс избирательного поглощения компонентов из природного газа жидким поглотителем (абсорбентом) при низких температурах, с дальнейшей регенерацией насыщенного абсорбента и извлечением тяжелых углеводородов.

На процесс НТА влияют следующие факторы: температура, требуемое качество продукта, давление, состав исходного газа, природа и физико-химические свойства абсорбента, число теоретических тарелок. В качестве хладагента в основном используют пропан при температуре от минус 30 °С до минус 40 °С. Данный температурный диапазон является наиболее оптимальным, при котором извлечение этана достигает 45 %, пропана 95 % и 100 % нестабильного газового бензина.

Отличие низкотемпературной абсорбции от масляной абсорбции помимо низких температур заключается в аппаратном оформлении процесса. При НТА необходимо установить сепаратор перед подачей газа в основную абсорбционную колонну, для дополнительного отделения конденсата [3].

Так как процесс НТА является экзотермическим, наблюдается выделение большого количества теплоты, особенно в верхней части абсорбера, где отбирают метан и этан. Вследствие этого необходимо организовать хороший теплоотвод по высоте абсорбера для более полного извлечения целевых компонентов (пропана, бутанов). Для этого необходимо производить охлаждение абсорбента в теплообменниках, которые могут быть вмонтированы непосредственно в абсорбер, или располагаться за пределами аппарата.

Технологическая схема НТА подразделяется на два блока:

- предварительное отбензинивание исходного природного газа;

|             |             |                 |                |             |                              |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|------------------------------|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>ВКР.19234.1.180301.ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |                              | 8           |

– НТА, где происходит извлечение оставшихся компонентов газа из предыдущего блока.

Исходя из данных, которые указаны выше, можно сделать вывод, что на оптимальный режим работы установок НТА влияют следующие факторы:

- температура потоков, поступающих в абсорбер;
- повышенное давление в блоке предварительного отбензинивания газа;
- насыщение регенерированного абсорбента легкими компонентами вне аппарата;
- физико-химическая природа абсорбента;
- теплосъем по высоте аппарата.

### 1.1.2 Низкотемпературная конденсация

Низкотемпературная конденсация – это процесс, который характеризуется охлаждением природного газа до заданной степени конденсации, которая зависит от глубины извлечения целевых компонентов [6].

Для оптимального протекания процесса требуются более пониженные температуры, по сравнению с низкотемпературной абсорбцией. Вследствие этого повышается четкость разделения, но и увеличиваются затраты на проведение процесса.

Современные технологические установки низкотемпературной конденсации включают в себе следующие узлы:

- компримирование газа до определенного давления;
- осушка газа;
- охлаждение газа до конденсации целевых компонентов;
- сепарация образовавшейся двухфазной системы;
- дезтанизация (деметанизация) жидкой фазы.

Усовершенствованной схемой процесса НТК считается схема с использованием турбодетандера, позволяющих конденсировать около 20 % жидкости. Схема установки НТК с турбодетандером представлена на рисунке 1.

Природный газ поступает в сепаратор 1, где очищается от водного кон-

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 9    |



установку очистки и газофракционирования. Часть потока подогревается в ре- бойлере 7 и возвращается в колонну для поддержания температурного режи- ма.

Газ с верха колонны, через теплообменники 8 поступает на сжатие в турбодетандер 3 и затем подается потребителю.

### 1.1.3 Низкотемпературная ректификация

Процесс низкотемпературной ректификации заключается в последова- тельном охлаждении природного газа до образования парожидкостной смеси, с последующим ее разделением в ректификационных колоннах при низких температурах.

Отличием процесса НТР от НТК заключается в том, что при НТК в рек- тификационную колонну подается сырье, которое предварительно разделяется в сепараторе, а при НТР вся парожидкостная смесь. По сравнению с другими способами данный метод разделения природного газа характеризуется высо- кой чистотой целевого продукта [7].

Ректификационные колонны в зависимости от технологической уста- новки делятся на ректификационно-отпарные и конденсационно-отпарные.

Более выгодным и распространенным вариантом является схема с двух- поточным вводом сырья, которая приведена на рисунке 2.

Сырой газ разделяется на два поток, первая часть (60 %) поступает сразу непосредственно в среднюю часть ректификационной колонны 5. Вторая часть потока (40 %) охлаждается в теплообменнике 1 обратным потоком сухо- го газа. Для предотвращения гидратообразования в поток сырьевого газа до- бавляют диэтиленгликоль. После охлаждения газ смешивается с верхним про- дуктом колонны , и объединенным потоком направляется в пропановый холо- дильник 2, где охлаждается до температуры минус 26 °С и затем направляет- ся на разделение в трехфазный сепаратор 3. Диэтиленгликоль собирается в нижней части аппарата и направляется в узел регенерации, сконденсирован- ные углеводороды насосом 4 подаются в верхнюю часть колонны.

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 11   |

Сухой газ после охлаждения исходного потока газа направляется потребителю.

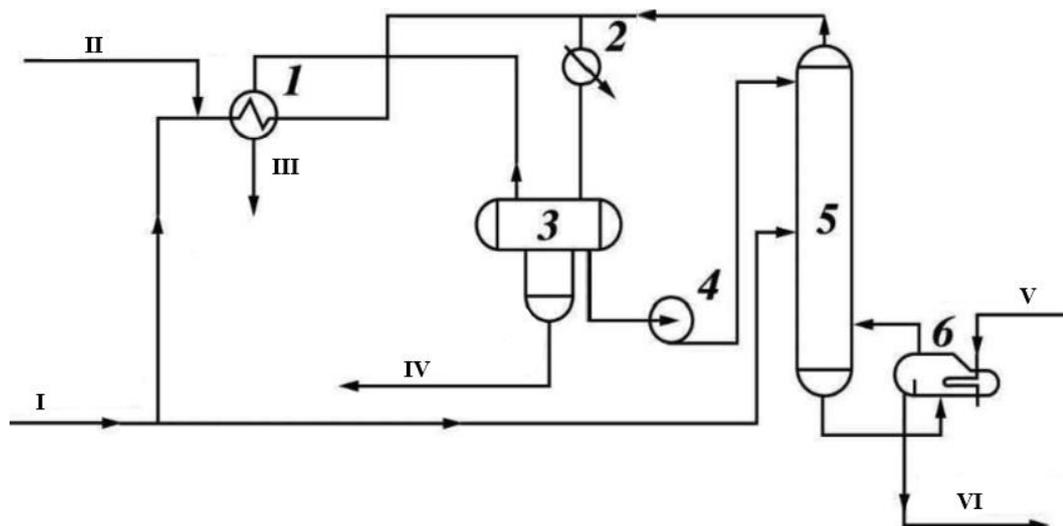


Рисунок 2 – Схема НТР с двухпоточным вводом сырья:

1 – теплообменник; 2 – пропановый испаритель; 3 – трехфазный сепаратор; 4 – насос; 5 – ректификационная колонна; 6 – ребойлер; I – сырой газ; II – диэтиленгликогь (99 %); III – сухой газ; IV – диэтиленгликоль (75 %); V - теплоноситель; VI – ШФЛУ

Часть ШФЛУ, отбираемой с куба колонны направляется в ребойлер 6 для поддержания температурного режима низа колонны.

#### 1.1.4 Низкотемпературная адсорбция

Метод НТ-адсорбции основан на избирательном поглощении компонентов газовой смеси твердым поглотителем (адсорбентом).

В газоперерабатывающей промышленности в основном используют адсорберы с неподвижным слоем адсорбента. В отличие от других процесс разделения газа, низкотемпературная адсорбция применяется также для осушки газа. Данный метод характеризуется высокими затратами и применяется в крайних случаях. На конечный результат и качество продукта влияет тепло-съем в адсорберах.

Все более часто внедряют процесс короткоциклового адсорбции. Распро-

странены два варианта короткоцикловых адсорбционных установок: с открытой и закрытой системой регенерации адсорбента.

Основным достоинством схемы с открытой системой регенерации состоит в компактности установки, простоте обслуживания, надежности в работе аппаратов, а также малые эксплуатационные затраты и расходы на ремонт. Недостатком является снижение производительности установки и ухудшение процесса конденсации десорбированных компонентов, за счет значительного расхода объема газа из сырьевого потока для регенерации адсорбента.

На установках с закрытой системой, газ регенерации прокачивается специальным компрессором по замкнутому циклу без возвращения в основной поток. Достоинством таких установок является высокий выход конденсата, недостатком является сложная эксплуатация из-за наличия компрессора в схеме установки.

Короткоцикловая адсорбция основывается на слабой адсорбции высоколетучих соединений с низкой полярностью, таких как водород или гелий, по сравнению с углеводородами. Таким образом данный процесс позволяет селективно поглощать большую часть примесей гелийсодержащего потока и получать товарный гелий высокой частоты [8].

Технологическая схема короткоцикловой адсорбции с открытой системой регенерации адсорбента представлена на рисунке 3.

Исходный поток сырьевого газа отделяется от углеводородного конденсата в сепараторе 1 и поступает сверху вниз в адсорбер 2. Сухой отбензиненный газ выводится с низа адсорбера, затем отдает свой холод в теплообменнике 4 и выводится с установки.

Примерно 27 % исходного потока газа направляется через регулирующий вентиль 6, трехходовой клапан 7 и поступает в печь 8, где нагревается до 300 °С. После этого горячий газ поступает сверху вниз адсорбера 9, находящегося на стадии регенерации. Адсорбент нагревается за счет контакта с газом до 200 °С, при этом тяжелые углеводороды и вода десорбируются и выходят в

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 13   |

парообразном состоянии с низа адсорбера вместе с потоком газа. Объединенным потоком охлаждаются в аппарате воздушного охлаждения 3, затем в теплообменнике 4, и при температуре около 20 °С пары воды и углеводородов конденсируются и разделяются в сепараторе 5.

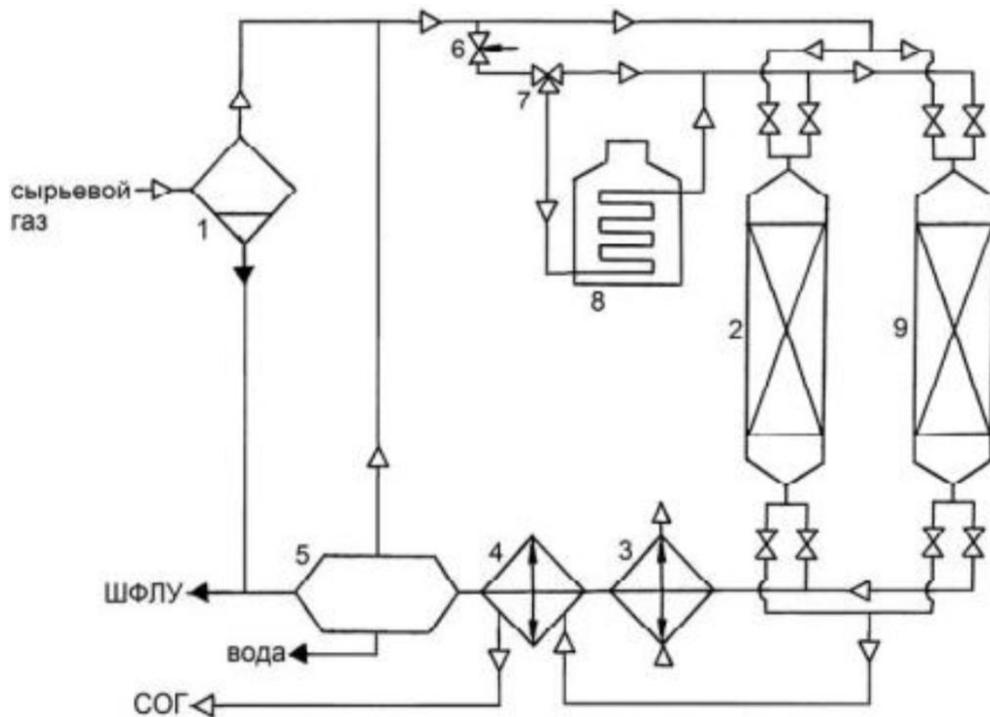


Рисунок 3 – Схема короткоцикловой адсорбции с открытой системой регенерации адсорбента:

- 1, 5 – сепараторы; 2, 9 – адсорберы; 3 – аппарат воздушного охлаждения;  
 4 – теплообменник; 6 – регулирующий клапан; 7 – трехходовой клапан;  
 8 – печь

Газ на выходе из сепаратора смешивается с исходным потоком газа, поступающим на установку.

При достижении предельной температуры регенерируемого слоя адсорбента трехходовой клапан 7 автоматически пропускает поток газа мимо печи 8. Холодный поток газа охлаждает слой адсорбента, и пройдя аппараты 3, 4, 5, смешивается с исходным потоком газа.

Продолжительность стадии адсорбции в адсорбере 2 равна продол-

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |
|      |      |          |         |      |

ВКР.19234.1.180301.ПЗ

Лист

14

жительности стадии десорбции и охлаждения в адсорбере 9. Затем адсорберы переключаются на противоположный режим работы.

Основным преимуществом является, что процесс протекает при температуре окружающей среды, что не требует энергозатрат на создание холода, тепло для генерации также не требуется, срок службы адсорбента составляет пять лет. Изменение температуры обосновано только теплом адсорбции и десорбции и понижением давления.

#### 1.1.5 Мембранный способ разделения

Мембранные процессы разделения характеризуются различной проницаемостью компонентов газовой смеси по отношению к мембране. В итоге образуется два потока: первый, проходящий через мембрану (пермеат), второй, уносимый с собой часть компонентов смеси (ретант) [9].

Мембранные процессы обладают следующими преимуществами:

- непрерывность процесса;
- легкость контроля;
- низкие энергетические затраты;
- масштабирование;
- возможность комбинирования с другими процессами;
- мягкие рабочие условия.

Недостатки мембранного процесса разделения:

- малый срок эксплуатации определенных видов мембран;
- возможность образования отложений на мембране.

Мембранный способ разделения многокомпонентных смесей обуславливается градиентами:

- давления (баромембранные процессы);
- электрического потенциала (электромембранные процессы);
- концентрации (диффузионно-мембранные)
- комбинацией различных факторов.

Самым распространенным методом разделения газовых смесей является

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 15   |

диффузионно-мембранный. Достоинствами данного метода являются:

- возможность формирования масштабных газоразделительных комплексов на основе различных мембранных моделей, компонованных в многократно повторяющиеся установки;
- простота конструкции мембранных аппаратов, на основе полимерных пленок и полых волокон;
- простота эксплуатации газоразделительных комплексов;
- организация доставки потребителям блоков полной готовности.

Два основных показателя, характеризующих мембрану при разделении компонентов газовой смеси: проницаемость и селективность. Проницаемость мембраны определяет ее производительность по данному компоненту, селективность ее разделительную способность. Эти показатели зависят от рабочей температуры, давления, присутствия каких-либо примесей и могут меняться в течение эксплуатации [10].

Для проведения мембранного разделения используют блоки различных конструкций: трубчатые, рулонные, плоскокамерные, с полыми волокнами.

Данные методы разделения применяются для комплексного извлечения из природного газа различных компонентов.

## **1.2 Способы выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси**

Природный газ с Ковыктинского и Чаяндиндинского месторождений, поступающий на Амурский ГПЗ, имеет сложный состав. Помимо метана содержится большое количество этана, пропана, бутана и других компонентов. Главной особенностью данных месторождений является большое содержание гелия в природном газе, который является стратегически важным объектом [11].

На Амурском ГПЗ реализуется система комплексной переработки газа с выделением этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси (азот, гелий, водород).

### **1.2.1 Выделение этана и ШФЛУ**

Этановая фракция является ценным сырьем для производства высоко-

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 16   |

молекулярных соединений. Газ большинства новых месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока характеризуется преимущественно высоким содержанием этана, который затем направляется на газохимические производства, именно этот фактор обуславливает необходимость модернизаций технологий для более глубокого извлечения фракции  $C_{2+}$  [12].

ШФЛУ – смесь очень ценных компонентов, которые являются сырьем для нефтехимической, газовой промышленности. После выделения из природного газа разделяется на следующие индивидуальные компоненты: пропан, бутан, пентан, гексан.

В настоящее время для извлечения этана применяют турбодетандеры с холодильным циклом. Многочисленные изучения и совершенствование работы детандеров показало их эффективность также при низком давлении, в этом случае газ дожимается до 4 – 7 МПа. Для предварительного охлаждения применяют пропановые холодильники, а также различные смеси хладагентов.

Технологическая схема для извлечения фракции  $C_{2+}$  из природного газа представлена на рисунке 4.

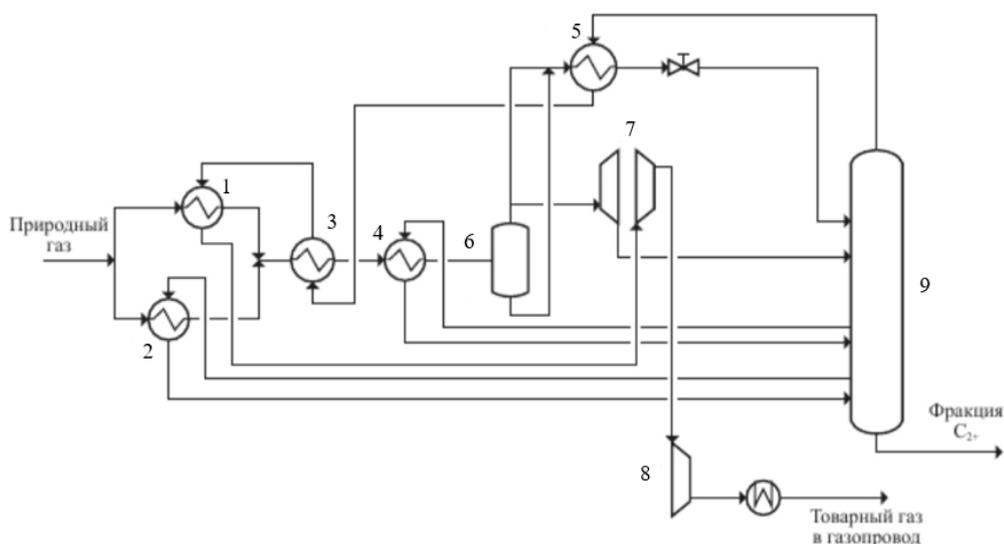


Рисунок 4 – Базовая технологическая схема установки разделения газа с выделением  $C_{2+}$ :

- 1 – 5 – рекуперативные теплообменники; 6 – сепаратор;  
7 – турбодетандер; 8 – компрессор; 9 – ректификационная колонна

По данной технологической схеме перерабатывается 12450 кмоль/час природного газа с коэффициентом извлечения этана примерно 90,2 % [13].

Получают ШФЛУ при отбесинивании природного газа или попутно нефтяного газа различными методами: низкотемпературной конденсации, низкотемпературной ректификации, низкотемпературной сепарации, при абсорбции и адсорбции, а также при стабилизации газового конденсата.

На Амурском ГПЗ выделение этана и ШФЛУ происходит последовательно в тарельчатых колоннах деметанизаторе и деэтанализаторе. В деметанизаторе отделяют метан и другие легкие компоненты от фракции  $C_{2+}$ .

Метановая фракция выходит с верхней части колонны и направляется на дальнейшую переработку. Кубовый продукт направляется в среднюю часть следующей колонны – деэтанализатора, предварительно нагреваясь до 24 °С.

Верхний продукт колонны деэтанализации – этановая фракция с температурой примерно минус 2 °С делится на две части. Одна часть переохлаждается приблизительно до температуры минус 51 °С и смешивается со второй частью потока. Объединенным потоком направляется в емкость, где разделяется на жидкую и газовую фазу. Жидкая фаза возвращается на орошение колонны, газовая фаза выводится с установки.

ШФЛУ, выделяемая с кубовой части деэтанализатора, охлаждается от 78 °С до 35 °С и направляется на разделение, с целью получения индивидуальных компонентов, на газофракционирующую установку.

В настоящее время увеличивается спрос в извлечении из ШФЛУ именно индивидуальных углеводородов для получения сырья, имеющего большой спектр применения в нефтехимической промышленности [14].

Природный газ, состоящий в основном из метана и других углеводородов, имеет ряд примесей, в частности гелий, азот, сероводород, меркаптаны, которые с одной стороны ухудшают в той или иной мере качество готовой продукции, а с другой стороны являются ценными компонентами.

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 18   |

### 1.2.2 Выделение гелия

В современном мире главным критерием технологического развития страны является выделение и применение гелия. Для этого необходимо создать систему комплексного использования природного газа, который является практически единственным источником для получения гелия. Природный газ, добываемый на Ковыктинском и Чайндинском месторождениях, характеризуется высоким содержанием гелия в пределах от 0,45 % до 0,8 % об [15].

Гелий – одноатомный инертный газ с молекулярной массой 4,002. Температура кипения при атмосферном давлении составляет минус 268,9 °С. Он не имеет запаха, вкуса и цвета, нетоксичен, негорюч, очень легкий, обладает хорошей теплопроводностью и повышенной теплоемкостью. Является вторым элементом по распространению после водорода [16].

Ценные свойства гелия, такие как химическая инертность, устойчивость к радиоактивному излучению, сверхпроводимость, сверхтекучесть объясняют его применение во многих отраслях науки. Основные направления применения гелия приведены в таблице 1 [17].

Таблица 1 – Области применения гелия

| Отрасль                   | Применение  |
|---------------------------|---|
| Авиация и воздухоплавание | Наполнитель для дирижаблей, аэростатов и других летательных аппаратов                               |
| Космонавтика              | Смесь для дыхания   |
| Ракетостроение            | Заместитель горючего и окислителя в топливных баках   |
| Атомная энергетика        | Теплоноситель в ядерных реакторах, в качестве хладагента в системе охлаждения в адронном коллайдере |
| Металлургия               | Защитный инертный слой при сварке металлов (алюминия, меди, титана и др.)                           |
| Медицина                  | Смесь гелия с кислородом используют в аппаратах ИВЛ, жидкий гелий в качестве хладагента в МРТ       |

Существует несколько способов получения гелиевого концентрата из

природного газа: криогенный, мембранный, абсорбционный, метод гидратообразования.

Наибольшего распространения получил криогенный метод, благодаря высокой эффективности процесса разделения и одновременному извлечению этана и ШФЛУ. Помимо этого увеличивается потребность в мембранных или комбинированных установках [18].

Данный метод выделения базируется на поэтапном охлаждении газа до температуры конденсации азота. При этом происходит конденсации метана и других углеводородов, а гелий остается в газовой фазе в виде концентрата [19].

На рисунке 5 представлена принципиальная схема получения гелиевого концентрата.

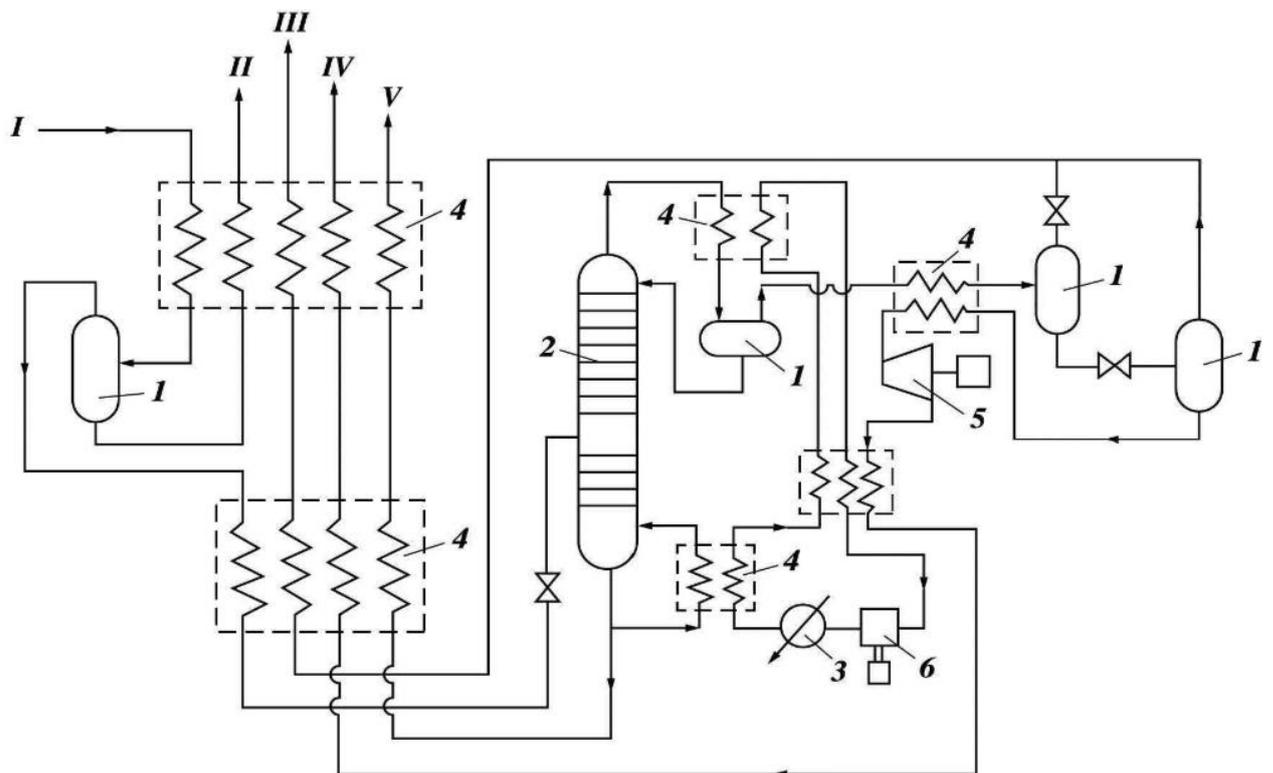


Рисунок 5 – Принципиальная схема получения гелиевого концентрата:

- 1 – сепаратор; 2 – ректификационная колонна; 3 – холодильник;  
 4 – криогенный теплообменник; 5 – турбодетандер; 6 – компрессор; I – природный газ; II – жидкие углеводороды; III – гелиевый концентрат; IV – концентрат азота; V – сухой газ (метан-азотная смесь)

Исходный поток природного газа с давлением 3,2 МПа охлаждается вначале в пропановом холодильнике, затем в двух криогенных теплообменниках 4 до температуры минус 104 °С, с промежуточным отделением конденсата в сепараторе 1. После дросселирования при температуре минус 153 °С подается в колонну 2.

Вверх колонны охлаждается за счет рекуперации холода. Температура верха составляет минус 191 °С, именно при таких значения отделяется смесь гелия и азота, которая направляется на доохлаждение в два рекуперативных теплообменника, и в двух сепараторах разделяется на концентрат гелия (85 %) и концентрат азота (99,5 %). Снизу этой колонны отводится в основном метан.

Способ выделения гелия с помощью мембранных установок основан на его высокой проникающей способности. Мембранные технологии характеризуются наименьшими затратами, по сравнению с криогенными технологиями, что является перспективным направлением в качестве повышения эффективности процесса.

Мембраны должны обладать высокой абсолютной проницаемостью для гелия и быть химически стабильными. Самыми эффективными и распространенными являются полимерные мембраны [20].

Помимо высоко фактора разделения мембрана должна обладать достаточно плотной упаковкой, так как газ подается под высоким давлением. В основном применяют рулонные и половолоконные мембраны.

Промышленные мембранные установки должны:

- иметь большую поверхность в единице объема аппарата;
- иметь доступ для осмотра и ремонта;
- обладать надежностью и высокой работоспособностью в течение длительного времени;
- обеспечивать равномерное распределение газа в напорном и дренажном пространстве мембраны;
- обладать низким гидравлическим сопротивлением.

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 21   |



в блок выделения чистого гелия, а ретант объединяется с потоком газа перед вторым мембранным модулем.

Для очистки гелия от микропримесей применяют низкотемпературную конденсацию и адсорбцию. Такие процессы обладают высокими энергетическими затратами, так как протекает при температуре от минус 175 °С до минус 200 °С.

Применение мембранных модулей значительно сокращает энергозатраты на проведение процесса, поэтому разрабатывается комбинированный метод: выделения гелиевого концентрата на мембранных установках и выделение чистого гелия криогенным методом (НТК и НТ-адсорбции). Такая комбинация позволяет сократить себестоимость продукта на 20 %.

Конечный продукт – товарный гелий концентрацией 99,98 % об., хранят в специальных газовых баллонах под давлением 15 МПа или в сжиженном виде.

Сжижение гелия производят охлаждением гелия жидким азотом, с последовательным детандированием и дросселированием. Полученный жидкий гелий хранят в сосудах Дьюара или в криогенных хранилищах. Требования к товарному гелию представлены в таблице 2 [21].

Таблица 2 – Требования к товарным продуктам установок получения гелия

| Объемная доля                  | А      | Б      | В      |
|--------------------------------|--------|--------|--------|
| 1                              | 2      | 3      | 4      |
| Гелия, % не менее              | 99,995 | 99,99  | -      |
| Гелия + неона, % не менее      | -      | -      | 99,99  |
| Водорода, % не более           | 0,001  | 0,0025 | 0,0025 |
| Кислорода + аргона, % не более | 0,0001 | -      | -      |
| Кислорода, % не более          | -      | 0,0005 | 0,001  |
| Азота, % не более              | 0,0005 | 0,002  | 0,004  |
| Аргона, % не более             | -      | 0,0001 | 0,001  |

| 1                                | 2      | 3      | 45    |
|----------------------------------|--------|--------|-------|
| CO <sub>2</sub> + CO, % не более | 0,0002 | 0,001  | 0,001 |
| Углеводородов, % не более        | 0,0001 | 0,0005 | 0,003 |
| Неона, % не более                | 0,004  | 0,009  | 0,04  |
| Паров, % не более                | 0,0005 | 0,002  | 0,002 |

Помимо традиционных мембранных установок, была разработана уникальная конфигурация данной установки – непрерывная мембранная колонна. Данная колонна по своим принципам разделения копирует ректификационные колонны [22].

Схема непрерывной мембранной колонны изображена на рисунке 7.



Рисунок 7 – Схема «непрерывной мембранной колонны»

Газовая смесь, состоящая из двух компонентов, подается в систему между двумя мембранными секциями. В процессе разделения смеси в колонне реализуется два противоточных потока. Один из потоков обогащен труднопроникающим компонентом, а другая часть легкопроникающим компонентом. Труднопроникающий компонент концентрируется в области высокого давления мембранного модуля, а легкопроникающий компонент в области низкого давления.

Максимальная эффективность колонны данного типа осуществляется только при таком режиме, когда отбор продуктов не из секции обогащения, не из секции извлечения не производится. Безотборный режим работы может быть организован как во всей колонне, так и в отдельных секциях.

Важно отметить, что потоки в полости низкого и высокого давления должны иметь одинаковые характеристики потока и состава.

Для определения эффективности колонны проводились различные экспериментальные расчеты. Расчетные и экспериментальные результаты продемонстрировали хорошую сходимость, что свидетельствует о возможности применения непрерывной мембранной колонне [23].

Данная установка проходит различные испытания для внедрения в масштабные производства.

Также была предложена двухстадийная схема мембранной установки, которая включает в себя две параллельные установленные колонны, где питающим потоком второй колонны является поток, отбираемый из секции извлечения первой колонны. Но такой вариант не получил более широкого применения, из-за недостатков данной конструкции.

### **1.3 Повышение энергоэффективности криогенных процессов**

Энергоэффективность – эффективное (рациональное) применение различных энергетических ресурсов, то есть использование меньшего количества энергии для обеспечения технологического процесса и выпуска высокого качества продукции [24].

Для повышения энергоэффективности необходимо модернизировать инфраструктуру и переоборудовать промышленные производства. Предпочтительным стало внедрение чистых и экологически безопасных технологий и промышленных процессов.

На Амурском ГПЗ реализуется выделение этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси из природного газа. Данный технологический процесс протекает при очень низких температурах, которые требуют достаточно высоких капитальных и эксплуатационных затрат. Извлечение таких ценных компонентов является неотъемлемой частью данного предприятия, и для более глубокого выделения необходимо постоянно совершенствовать уже созданные установки [25].

### 1.3.1 Совершенствование процесса выделения этана и ШФЛУ

Этан, выделяемый из природного газа на Амурском ГПЗ, направляется на установку пиролиза на Амурском ГХК, для получения этилена. Этилен является ценным сырьем для многих продуктов нефтехимического синтеза, в особенности для получения полиэтилена. Именно такие условия объясняют необходимость внедрения и разработки новых методов для более четкого выделения этановой фракции.

Основное количество этана получают разделением природного газа в ректификационных колоннах с дефлегматором. На количества выделяемого продукта влияет способ охлаждения природного газа, от которого также зависят затраты на осуществления процесса, и его энергоэффективность. Существует три варианта схем орошения колонны деметанизатора [26].

Первый вариант с применением рецикла на «холодном» компрессоре, схема изображена на рисунке 8.

Отличие от базового варианта по данной схеме состоит в разделении верхнего продукта колонны, часть которого поступает в компрессор 7, затем охлаждается в теплообменнике 6, проходит дросселирующий клапан и обратно возвращается в верхнюю часть колонны в качестве орошения. Такое усовер-

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 26   |

шенствование позволило увеличить коэффициент извлечения этана до 99,3 % при соответствующем увеличении энергозатрат всего на 1 %.

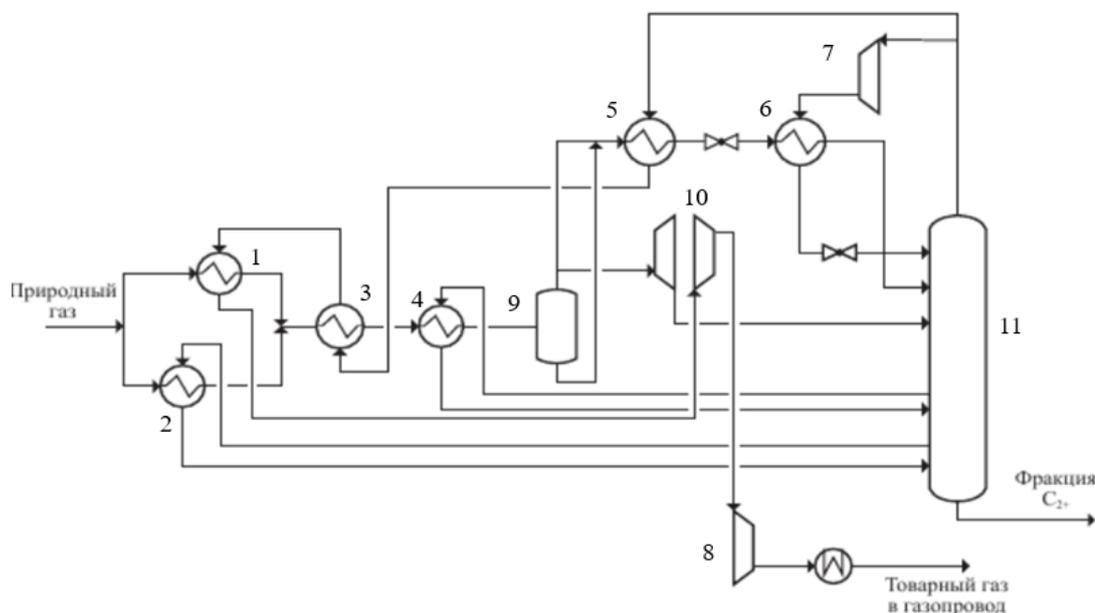


Рисунок 8 – Технологическая схема установки для разделения природного газа с рециклом на «холодном» компрессоре:

1 – 6 – рекуперативные теплообменники; 7, 8 – компрессор;  
9 – сепаратор; 10 – турбодетандер; 11 – ректификационная колонна

В следующем варианте применяют рецикл газа на «теплом» компрессоре. Схема второго варианта приведена на рисунке 9.

Орошение колонны осуществляется практически тем же путем, что и в предыдущем варианте, но на теплом газе. Газ с верхней части колонны проходит через рекуперативный теплообменник 7, компрессор 9 и аппарат воздушного охлаждения. Затраты энергии на извлечения этана выше на 4 %, чем в базовом варианте.

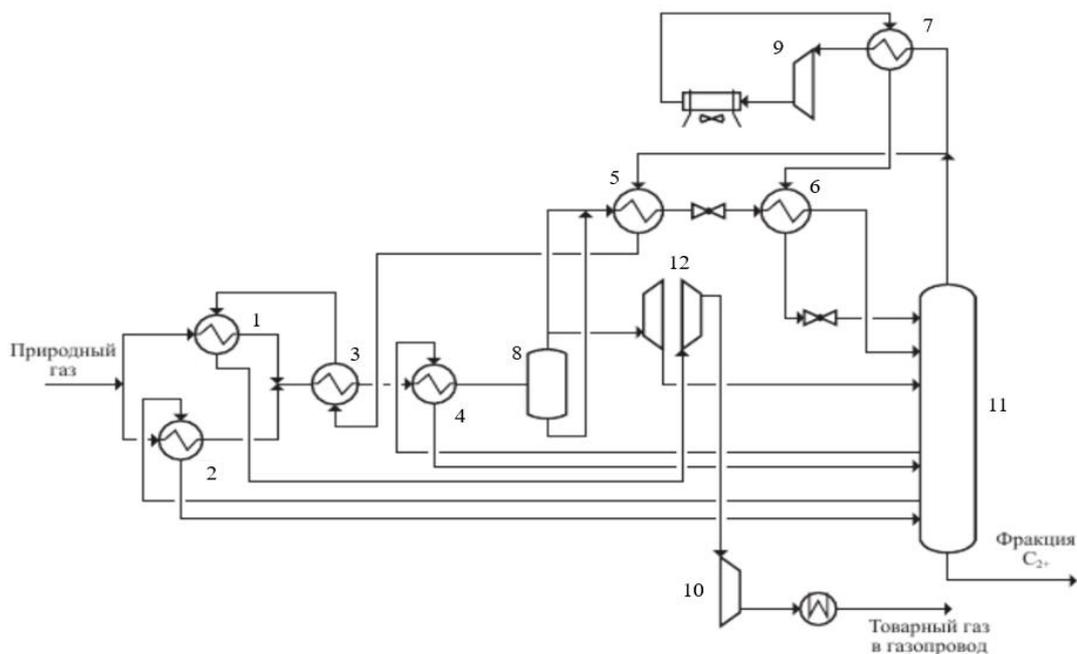


Рисунок 9 – Технологическая схема разделения природного газа с рециклом на «теплом» компрессоре:

- 1–7 – рекуперативные теплообменники; 8 – сепаратор;  
 9,10 – компрессор; 11 – ректификационная колонна  
 12– турбодетандер

В третьем варианте вместо дополнительного компрессора был установлен дополнительный турбодетандер. Технологическая схема варианта представлена на рисунке 10.

Поток газа на выходе из колонны расширяется в турбодетандере 8 и затем возвращается в колонну в качестве орошения. Коэффициент извлечения этана по данному варианту достигает 99 %, но при этом энергозатраты увеличиваются на 33 % по сравнению с базовым вариантом. Такая установка является экономически не оправданной [27].

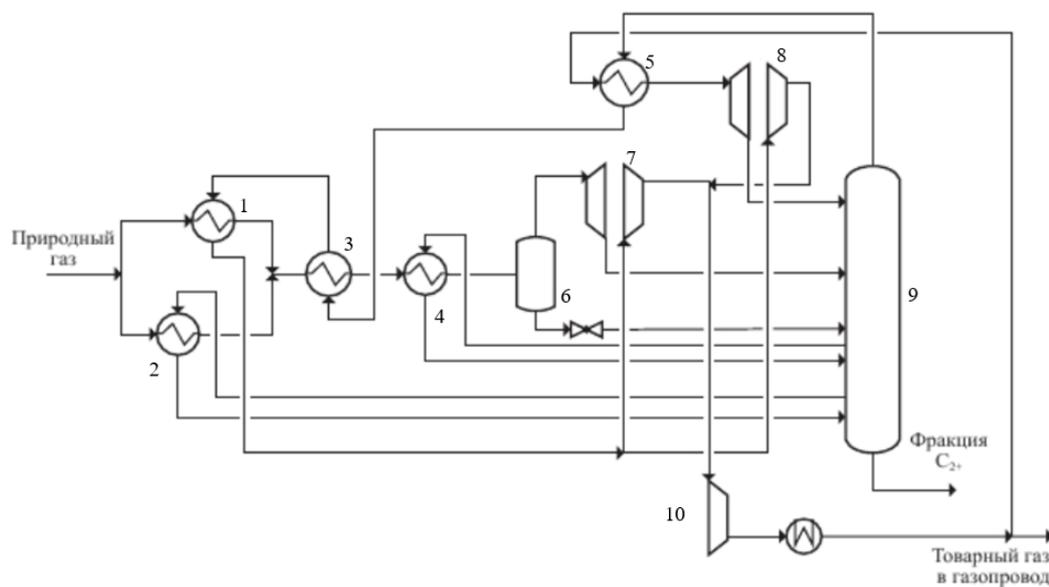


Рисунок 10 – Технологическая схема установки разделения природного газа с двумя турбодетандерами:  
 1 – 5 – рекуперативные теплообменники; 6 – сепаратор;  
 7,8 – турбодетандеры; 9 – ректификационная колонна;  
 10 – компрессор

Одним из способов модернизации низкотемпературной с целью увеличения выработки этановой фракции и ШФЛУ является разделение потока газа, прошедшего турбодетандер, в дополнительном модуле низкотемпературной сепарации, которая включает в себя сепаратор, емкость для сбора жидкости и насос, для перекачки жидкой фазы [28].

Жидкая фаза, обогащенная этаном, после отделения в сепараторе, направляется в дальнейшую переработку.

Таким образом, внедрение блока НТС позволяет повысить выделение этановой фракции на 1,3 % масс., а ШФЛУ на 0,3 % масс [29].

Эффективность процесса можно повысить за счет внедрения в производство безмасляных-турбодетандеров.

Устройство турбодетандера представлено на рисунке 11.

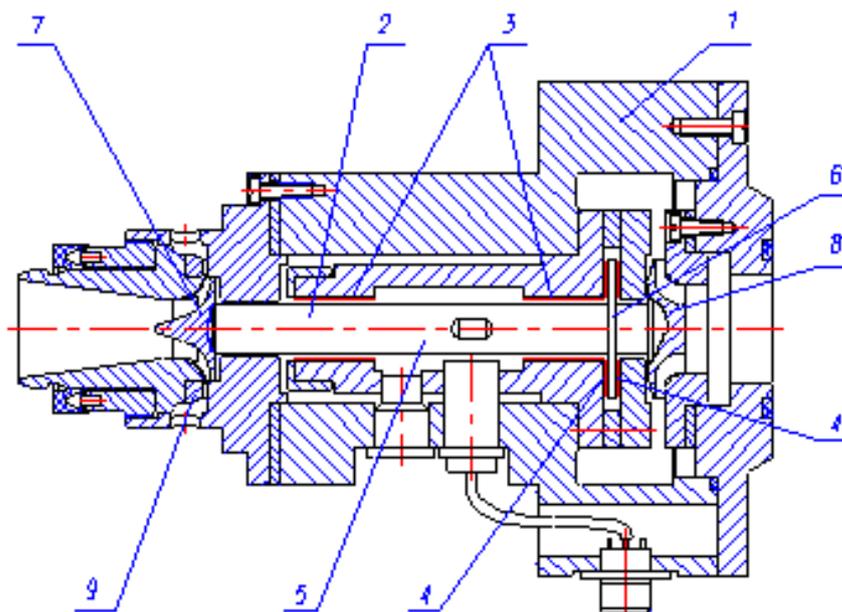


Рисунок 11 – Турбодетандер с лепестковыми газодинамическими подшипниками:

1 – корпус; 2 – ротор, 3 – лепестковые радиальные подшипники; 4 – лепестковые осевые подшипники; 5 – вал; 6 – пяты; 7 – рабочее колесо турбины; 8 – тормозное колесо; 9 – направляющий аппарат

Принцип работы такого аппарата заключается в следующем: газ, сжатый в компрессоре, направляется в сопла направляющего аппарата 9, расширяется и за счет увеличения скорости попадает на лопатки рабочего колеса. Продолжая расширяться, газ постепенно перемещается в центр рабочего колеса и начинает вращать ротор, при этом газ совершает работу и постепенно охлаждается. Мощность от вращения ротора используется на сжатие газа тормозным колесом в воздушном замкнутом контуре, который включает в себя воздушно-водяной теплообменник. Воздушный контур заменяет необходимость использования масляного тормозного контура [30].

Главная особенность таких турбодетандеров заключается в замене масляных опор на газовые подшипники, что позволяет снизить потери мощности трения, вследствие этого часть сэкономленной энергии направляется на установку. Помимо этого не требуется подача масла в системы опоры и его охлаждения.

Таким образом уменьшаются затраты на электроэнергию и увеличивается энергоэффективность работы.

### 1.3.2 Совершенствование процесса выделения азотно-гелиевой смеси

Многие эксперты прогнозируют, что потребление гелия с каждым годом будет увеличиваться и к 2030 году достигнет примерно 238 – 312 млн. м<sup>3</sup>, в то время как его производство будет составлять 212 – 238 млн. м<sup>3</sup>. Можно сделать вывод, что увеличение отбора гелия из природного газа является одной из актуальных пробел в настоящее время [31].

На Чайядинском нефтегазоконденсатном месторождении для извлечения гелия применяют мембранные установки непосредственно на промысле. Главным достоинством такого технологического решения является тот факт, что на завод поступает то количество гелия, которое является востребованным в данный период времени.

Гелий выделяют из природного газа криогенным методом. Модернизация криогенного блока выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси состоит в использовании дополнительных дросселирующих устройств для охлаждения газа. Понижение температуры достигается в последовательном перепаде давлений в разных дросселирующих устройствах [32].

Мембранные технологии для разделения газа являются наиболее перспективными для повышения энергоэффективности процесса. При использовании мембранных процессов уменьшается соотношение энергопотребления / образование отходов, что приводит к более рациональному использованию сырья, а также к повторному использованию выделенных продуктов.

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 31   |

В перспективе одним из масштабных решений является комбинация криогенного и мембранного метода извлечения гелия [33].

Технология подразумевает направление природного газа после процесса осушки в мембранный модуль, где будет отделяться поток гелия от метана, этана и ШФЛУ. Поток гелия затем направляется на концентрирование, очистку от микропримесей и сжижение. А поток метана, этана и ШФЛУ в криогенный блок на дальнейшую переработку. Затраты на энергопотребление при комбинированной технологии снижаются примерно в 8 раз, при сохранении качества готовой продукции.

В последнее время приоритетным направлением в добыче гелия является его хранение в газообразном виде. Обратная закачка в пласт по сравнению со специально разработанными хранилищами влечет за собой большие потери, что связано с негерметичностью скважин и высокой проницаемостью гелия [34].

Поэтому в виду увеличения выработки гелия строительство подземных хранилищ является актуальным направлением, которое будет выгодно как для потребителей, так и для поставщиков.

Соленосный бассейн на участке Чаяндинского солевого отложения является уникальным для разработки хранилища гелиевого концентрата с применением солевых каверн [35].

Основные недостатки и преимущества хранения гелия в солевых кавернах представлены в таблице 3 [36].

Таблица 3 – Преимущества и недостатки хранения гелия в солевых кавернах

| Преимущества   | Недостатки                     |
|--|--------------------------------|
| 1  | 2                              |
| Герметичность  | Высокие капитальные затраты    |
| Сохранение товарных требований гелия во время хранения | Длительный срок строительства  |
| Ввод с эксплуатацию протекает постепенно               | Неоднородность солевого пласта |

| 1   | 2   |
|---|---|
| Возможность использования резервуаров для хранения других продуктов | Недостаточность солевого пласта                       |
| Сохранение качества продукта при его контакте с каменной солью      | Необходима низкая суточная производительность скважин |

При анализе было выявлено, что создание крупных подземных хранилищ является экономично верным решением для «Газпром» [37].

Таким образом, для повышения энергоэффективности выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси на Амурском ГПЗ можно спроектировать комбинированную установку мембранного модуля и криогенного блока. Преимуществом такой модернизации является понижение затрат на создание холода, который требуется для разделения природного газа в колоннах.

## 2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Характеристика сырья и готовой продукции

Сырьем, поступающим на установку криогенного выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси, является осушенный и очищенный от сернистых соединений и механических примесей природный газ. Характеристика природного газа приведена в таблице 4 [38].

Таблица 4 – Характеристика сырья

| Наименование сырья                  | Национальный стандарт, технические условия, регламент или методика на подготовку сырья, стандарт организации             | Показатели, обязательные для проверки, единицы измерения   | Регламентирующие показатели |
|-------------------------------------|--|--|-----------------------------|
| 1                                   | 2  | 3  | 4                           |
| Осушенный и очищенный природный газ | СТО 089-2010 «Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия» | Температура точки росы газа по воде, при абс. давлении 3,92 МПа, °С, не выше<br>– зимний период<br>– летний период                   | минус 10<br>минус 10        |
|                                     |  | Температура точки росы газа по углеводородам, при абс. давлении от 2,5 до 7,5 МПа, °С, не выше<br>– зимний период<br>– летний период | минус 2<br>минус 2          |
|                                     |  | Массовая концентрация сероводорода, г/м <sup>3</sup> , не более  | 0,007                       |
|                                     |  | Массовая концентрация меркаптановой серы, г/м <sup>3</sup> , не более  | 0,016                       |

|                  |                      |                 |                |             |  |                            |             |               |
|------------------|----------------------|-----------------|----------------|-------------|--|----------------------------|-------------|---------------|
|                  |                      |                 |                |             | <i>ВКР.19234.1.180301.ПЗ</i>   |                            |             |               |
| <i>Изм.</i>      | <i>Лист</i>          | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  |                            |             |               |
| <i>Разраб.</i>   | <i>Холодная Н.Е.</i> |                 |                |             | <i>Повышение энергоэффективности процесса криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа на Амурском ГПЗ</i> | <i>Лит.</i>                | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> |
| <i>Провер.</i>   | <i>Гужель Ю.А.</i>   |                 |                |             |  | У                          | 34          | 82            |
| <i>Реценз.</i>   |                      |                 |                |             |  | <i>АМГУ ИФФ 918-од гр.</i> |             |               |
| <i>Н. Контр.</i> | <i>Родина Т.А.</i>   |                 |                |             |  |                            |             |               |
| <i>Утверд.</i>   | <i>Гужель Ю.А.</i>   |                 |                |             |  |                            |             |               |

Продолжение таблицы 4

| 1 | 2 | 3   | 4               |
|---|---|---|-----------------|
|   |   | Массовая концентрация механических примесей, г/м <sup>3</sup> , не более                              | 0,001           |
|   |   | Молярная доля диоксида углерода, %, не более  | 2,5             |
|   |   | Плотность при стандартных условиях, кг/м <sup>3</sup>   | Не нормируется  |
|   |   | Теплота сгорания низшая при стандартных условиях, МДж/м <sup>3</sup> (ккал/м <sup>3</sup> ), не менее | 31,80<br>(7600) |

Готовой продукцией установки криогенного выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси является:

- азотно-гелиевая смесь;
- деэтанализованная метановая фракция;
- этановая фракция;
- широкая фракция легких углеводородов.

Азотно-гелиевая смесь выводится с установки как полупродукт, который направляется на установку тонкой очистки, сжижения и затаривания гелия, где производится его очистка от метана, азота и различных микропримесей. Сжижение гелия происходит за счет расширения в турбодетандерах. Жидкий гелий направляется в товарный парк, откуда осуществляется его поставка на внутренний рынок, а также экспорт в Китай и другие страны. Транспортировка сжиженного гелия осуществляется автоцистернами типа 1АА автомобильным и морским транспортом. Основными производителями оборудования для транспортировки являются компании из США, Германии и Японии.

В настоящее время в обороте находится около 1100 контейнеров по всему миру. Один контейнер перевозит до 36 000 литров сжиженного гелия, время

|      |      |          |         |      |  |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|--|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      |  | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |  |                       | 35   |

бездренажного хранения варьируется от 30 до 45 суток.

В нынешних условиях одним из перспективных направлений является разработка и внедрение отечественных автоцистерн для обеспечения экономической и стратегической безопасности и независимости при производстве и транспортировке сжиженного гелия и других продуктов в сжиженном виде.

Характеристика автоцистерн отечественного производства приведена в таблице 5 [39].

Таблица 5 – Характеристика контейнеров-цистерн для перевозки сжиженного гелия

| Общая информация                                   |                         |
|--|-------------------------|
| Производитель                                      | Марка контейнер-цистерн |
| ОАО «НПО «Гелиймаш»                                | ЦТГ-40/0,45             |
| Техническая часть                                  |                         |
| Технические характеристики                         | Значения                |
| Объем гелиевого сосуда, м <sup>3</sup>             | 40                      |
| Рабочее давление, МПа                              | 0,45                    |
| Масса заливаемого гелия, кг                        | 4500                    |
| Контрольное время удержания гелия, сутки, не более | 30                      |
| Масса заливаемого азота, кг                        | 1200                    |
| Масса порожнего контейнера, кг                     | 18500                   |

В настоящее время разработана усовершенствованная конструкция контейнера-цистерны марки КЦГ-40/0,5, рассчитанная на увеличение бездренажного хранения гелия.

На Амурском ГПЗ для транспортировки сжиженного гелия создана логистическая инфраструктура, на котором располагается специальная автотехника – КАМАЗ-5490 NEO, в которых в качестве моторного топлива используют сжиженный природный газ. Наличие двух криобаков позволяет совершить перевозку до 1400 км без дозаправки с полной нагрузкой, что является важным фактом в условиях перевозки на Дальнем Востоке.

Деэтанализованная метановая фракция поступает на дожимную компрессорную станцию, где происходит ее сжатие газотурбинными агрегатами

давления от 5,6 до 6,7 МПа, соответствующего давлению в магистральных газопроводах. Затем через газопровод «Сила Сибири» товарный газ направляется на экспорт в Китай и другие Азиатско-Тихоокеанские регионы.

Этановая фракция выводится с установки как товарный продукт и направляется потребителю. При вводе в эксплуатацию Амурского газохимического комплекса планируется поставка этановой фракции в качестве сырья для процесса пиролиза, с целью получения этилена. Этилен является ценным сырьем для многих процессов нефтехимического синтеза. Из него производят полиэтилен низкой и высокой плотности, каучуки, ацетальдегид, уксусный ангидрид.

Широкая фракция легких углеводородов с установки направляется на очистку от меркаптановой серы, сероводорода и метанола. Затем ШФЛУ поступает на газфракционирующую установку для выделения товарных сжиженных углеводородных фракций: пропановая фракция, бутановая фракция, пентан-гексановая фракция.

Описание требований к параметрам и качественным характеристикам продукции данной установки представлены в таблице 6 [40 – 42].

Таблица 6 – Требования к качественным характеристикам продукции

| Наименование сырья    | Национальный стандарт, технические условия, регламент или методика на подготовку сырья, стандарт организации | Показатели, обязательные для проверки, единицы измерения | Регламентирующие показатели |
|-----------------------|--|--|-----------------------------|
| 1                     | 2  | 3  | 4                           |
| Азотно-гелиевая смесь | Протокол испытаний в лаборатории   | 1. Молярная доля водорода, % мол., не более              | 1,0550                      |
|                       |  | 2. Молярная доля гелия, % мол., не менее                 | 6,5900                      |
|                       |  | 3. Молярная доля аргона, % мол., не более                | 0,0005                      |
|                       |  | 4. Молярная доля метана, % мол., не более                | 0,0039                      |
|                       |  | 5. Молярная доля азота, % мол., не менее                 | 92,3470                     |
|                       |  | 6. Молярная доля неона, % мол., не более                 | 0,0013                      |

Продолжение таблицы 6

| 1   | 2  | 3  | 4                   |    |
|---|--|--|---------------------|----|
| Товарный газ  | ГОСТ 5542-2014<br>«Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия» [40] | 1.Компонентный состав, % мол.                                    |                     |    |
|   |  | – метан, не менее  | 85                  |    |
|   |  | – этан, не более   | 6                   |    |
|   |  | – пропан, не более   | 3                   |    |
|   |  | – азот, не более   | 2                   |    |
|   |  | – двуокись углерода, не более                                    | 2                   |    |
|   |  | – общее содержание серы, не более                                | 30                  |    |
|   |  | 2.Точка росы газа по воде при давлении 4 МПа, °С                 |                     |    |
|   |  | – зимний период  | минус 20            |    |
|   |  | – летний период  | минус 10            |    |
| 3.Точка росы газа по углеводородам при давлении 2,7 МПа, °С |  |  | минус 5             |    |
| 4.Содержание ртути, г/м <sup>3</sup> , не более             |  |  | 20·10 <sup>-6</sup> |    |
| Товарная этановая фракция                                   | ТУ 0272-155-31323949-2014 изм. 1 «Фракция этановая. Технические условия» [41]  | 1.Компонентный состав, % мол.                                    |                     |    |
|   |  | – метан, не более  | 2                   |    |
|   |  | – этан, не менее   | 95                  |    |
|   |  | – пропан, не более   | 3                   |    |
|   |  | – оксид углерода, не более                                       | 0,02                |    |
|   |  | – сероводород, не более  | 0,002               |    |
|   |  | – общее содержание серы, не более                                | 0,002               |    |
| 2. Содержание метанол, млн <sup>-1</sup> , не более         |  |  | 50,0                |    |
| Широкая фракция легких углеводородов                        | ТУ 38.101524-2015 изм.1 «Широкая фракция легких углеводородов. Технические условия» [42]                             | Марка фракции  | А                   | Б  |
|   |  | 1.Компонентный состав, % вес.                                    |                     |    |
|   |  | – метан и этан в сумме, не более                                 | 3                   | 5  |
|   |  | – пропан, не менее   | 15                  | –  |
|   |  | – сумма углеводородов C <sub>4</sub> – C <sub>5</sub> , не менее | 45                  | 40 |
|   |  | – сумма углеводородов C <sub>6+</sub> , не более                 | 15                  | 30 |

| 1 | 2 | 3  | 4     |       |
|---|---|--|-------|-------|
|   |   | 2. Содержание метанола, % масс., не более                          | 0,15  | –     |
|   |   | 3. Содержание сероводорода и меркаптановой серы, % масс., не более | 0,025 | 0,025 |

## 2.2 Описание технологической схемы

Технологическая схема установки выделения этана, ШФЛУ, азотно-гелиевой смеси из природного газа представлена на рисунке 12.

Сырьевой газ, подаваемый на установку криогенного выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси, при температуре 13 °С и давлении 7,25 МПа подается в первый пластинчато-ребристый теплообменник Т-1. В теплообменнике исходный поток газа охлаждается обратным потоком метановой фракции до температуры минус 35 °С. Частично сконденсированный газ поступает в сепаратор С-1, где разделяется на жидкую и газовую фазу.

Газ из сепаратора С-1 подается в турбодетандер ТД-1, где расширяется до давления 4,7 МПа и охлаждается до температуры минус 48 °С. Мощность на валу детандера ТД-1 используется в генераторе электроэнергии Г. Затем поток газа из турбодетандера объединяется с потоком жидкой фазы из сепаратора С-1 и направляется на вторую ступень сепарации в сепаратор С-2 для отделения газа от жидкости.

Газ из сепаратора С-2 подается во второй пластинчато-ребристый теплообменник Т-2, где охлаждается до температуры минус 72 °С, при этом происходит частичная конденсация потока. Жидкая фаза из сепаратора С-2, представляющая собой смесь тяжелых углеводородов, подается в колонну деметанизации К-1 при температуре минус 55 °С и давлением 3,7 МПа.

Газ, после охлаждения в теплообменнике Т-2, подается в сепаратор С-3 при температуре минус 70 °С и давлении 4,3 МПа, где жидкая фаза и газ разделяются.

Жидкая фаза при температуре минус 80 °С направляется в верхнюю секцию колонны деметанизации К-1, а газ разделяется на два потока.

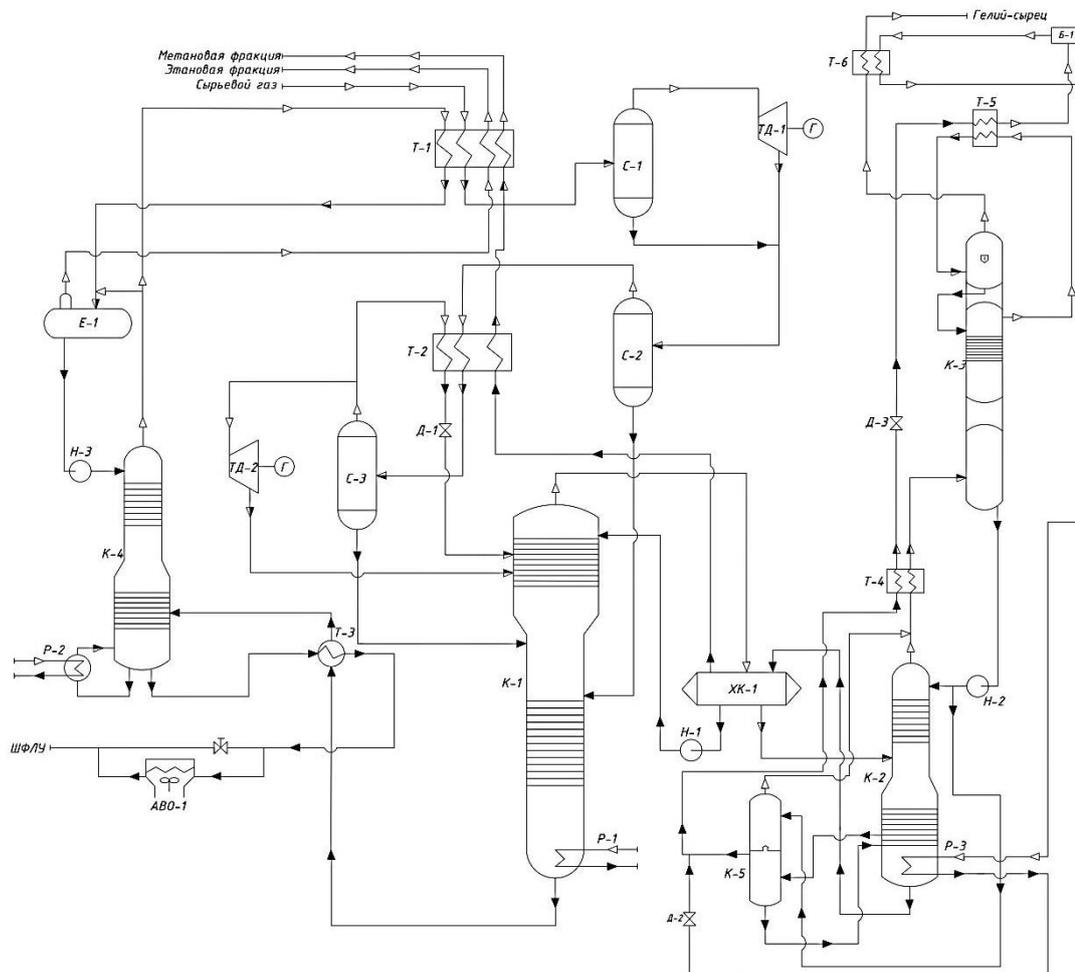


Рисунок 12 – Технологическая схема процесса криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа:

Т-1-2-4-5-6 – пластинчато-ребристые теплообменники; Т-3 – рекуперативный теплообменник; С-1-2-3 – сепаратор; ТД-1-2 – турбодетандер; Г – генератор; Д-1-2-3 – дроссели; К-1 – колонна деметанизации; К-2 – колонна для извлечения азотно-гелиевой смеси; К-3 – колонна для концентрирования азотно-гелиевой смеси; К-4 – колонна дезэтанзации; К-5 – колонна подпитки хладагента; Р-1 – ребойлер куба деметанизатора; Р-2 – ребойлер куба дезэтанзатора; Р-3 – ребойлер куба колонны для извлечения азотно-гелиевой смеси; ХК-1 – холодильник-конденсатор; Е-1 – емкость для этанового дистиллята; Н-1-2-3 – насос; АВО-1 – аппарат воздушного охлаждения

Один поток газа направляется в турбодетандер ТД-2, где расширяется до давления 2,9 МПа и охлаждается до температуры минус 90 °С и подается в колонну деметанизации в качестве сырьевого потока. Второй поток газа охлаждается в теплообменнике Т-2 до температуры минус 103 °С и, расширяясь на дросселе Д-1 до рабочего давления деметанизатора 2,9 МПа, подается в колонну К-1 в качестве орошения.

Колонна деметанизации К-1 предназначена для отделения метана и более легких компонентов, таких как азот и гелий от фракции  $C_{2+}$ . Подвод тепла в колонну К-1 осуществляется подачей пара низкого давления в ребойлер Р-1, который вмонтирован в нижнюю часть колонны.

Параметры работы колонны К-1:

- давление верха составляет 2,8 МПа;
- температура верха минус 98 °С;
- давление куба не более 2,9 МПа;
- температура низа не более 20 °С.

Верхний продукт колонны К-1 при температуре минус 97 °С и давлении 2,8 МПа поступает в холодильник-конденсатор ХК-1. Кубовым продуктом является фракция  $C_{2+}$ , которая подается на дальнейшее разделение.

В холодильнике-конденсаторе ХК-1 верхний продукт колонны охлаждается до минус 104 °С и при давлении 2,8 МПа поступает в колонну К-2.

Фракция  $C_{2+}$  подается в теплообменник Т-3, где нагревается до 24 °С и направляется в среднюю секцию колонны дезтанизации К-4.

Колонна К-2 предназначена для извлечения азотно-гелиевой смеси из метановой фракции. В результате нижний продукт колонны содержит около 1,4 % мол. азота и не содержит других более легких компонентов.

Параметры работы колонны К-2:

- давление верха составляет 2,6 МПа;
- температура верха минус 108 °С;
- давление низа не более 2,7 МПа;

– температура куба минус 100 °С.

Необходимая тепловая нагрузка в кубе колонны осуществляется за счет конденсации хладагента высокого давления в ребойлере Р-3.

Верхний продукт выводится из колонны при температуре минус 108 °С и направляется в теплообменник Т-4, где охлаждается до температуры минус 118 °С за счет частичного испарения хладагента среднего давления.

Кубовым продуктом колонны К-2 является жидкий метан, который направляется в конденсатор ХК-1 в качестве охлаждающей среды. Основная часть жидкого метана при температуре минус 100 °С и давлении 2,0 МПа направляется последовательно в теплообменник Т-2 и Т-1 для охлаждения входящих потоков газа. После теплообменника Т-1 метановая фракция при температуре 8 °С и давлении 1,7 МПа выводится с установки и направляется на дожимную компрессорную станцию.

Небольшая часть жидкого метана (7 %) из конденсатора ХК-1 прокачивается насосом Н-1 и подается на орошение колонны К-1 при температуре минус 104 °С и давлении 2,85 МПа.

Пары с верха колонны К-2 после охлаждения частично конденсируются и подаются в кубовую часть колонны К-3. Данная колонна предназначена для более глубокой очистки азотно-гелиевой смеси от метана, для показателей, соответствующих чистоте азотно-гелиевой смеси.

Параметры работы колонны К-3:

- давление верха составляет 2,45 МПа;
- температура верха минус 156 °С;
- давление низа не более 2,5 МПа;
- температура куба минус 119 °С.

Верхний продукт колонны при температуре минус 155 °С и давлении 2,45 МПа поступает теплообменник Т-5, где частично конденсируется при помощи хладагента низкого давления до температуры минус 160 °С, и затем возвращается в сепаратор, который вмонтирован в верхнюю секцию колонны

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 42   |

К-3. Гелий-сырец из колонны К-3 направляется в теплообменнике Т-6, где нагревается до температуры 35 °С и далее направляется на установку очистки, сжижения и затаривания гелия.

В качестве хладагента на установке выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси используется смесь азота и метана. Подпитка хладагента на установке производится из глухой тарелки колонны подпитки хладагента К-5. Колонна имеет 34 ситчатые тарелки.

Параметры колонны К-5:

- давление верха составляет 2,6 МПа;
- температура верха минус 108 °С;
- давление низа не более 2,7 МПа;
- температура куба минус 102 °С.

С глухой тарелки колонны К-5 отбирается хладагент среднего давления с определенным соотношением метана и азота при температуре минус 108 °С и давлении 2,6 МПа, который охлаждает верхний продукт колонны К-2, при этом частично нагревается до температуры минус 96 °С. Затем хладагент среднего давления дросселируется в Д-3 при этом расширяется до давления 0,98 МПа и охлаждается до температуры минус 165 °С.

Далее хладагент низкого давления в теплообменнике Т-5 нагревается до температуры 30 °С и поступает в блок теплового насоса, где сжимается последовательно в компрессорах. На выходе из блока теплового насоса хладагент высокого давления при температуре 45 °С и давлении 4,5 МПа поступает в теплообменник Т-6, где охлаждается до температуры минус 90 °С. Далее поток хладагента направляется в ребойлер Р-3, где конденсируется до температуры минус 99 °С и затем дросселируется в Д-2 до давления 2,65 МПа. Далее поток смешивается с потоком хладагента среднего давления.

Жидкие углеводороды из куба колонны К-3 при температуре минус 118 °С прокачиваются насосом Н-2 и подаются в качестве орошения в колонну К-2. Часть потока направляется на орошение колонны подпитки хла-

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
|      |      |          |         |      |                       | 43   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       |      |

дагента К-5.

Фракция  $C_{2+}$  после отделения в колонне К-1 направляется в межтрубное пространство теплообменника Т-3 и подается в нижнюю секцию колонны К-4. В теплообменнике Т-3 фракция подогревается от 20 °С до 24 °С кубовым продуктом колонны К-4.

Колонна К-4 предназначена для отделения этана от фракции  $C_{3+}$ . Требуемый подвод тепла в колонну осуществляется с помощью ребойлера Р-2 за счет подачи пара низкого давления.

Параметры работы колонны К-4:

- давление верха составляет 2,3 МПа;
- температура верха 8 °С;
- давление низа не более 2,35 МПа;
- температура куба 77 °С.

Верхний продукт колонны К-4 при температуре 6 °С и давлении 2,2 МПа разделяется на два потока. Один поток направляется в пластинчато-ребристый теплообменник Т-1, где он охлаждается до температуры минус 48 °С. Оставшаяся часть потока соединяется с переохлажденным потоком, и объединенным потоком при температуре минус 6 °С направляются в рефлюксную емкость Е-1. Газ из емкости направляется в пластинчато-ребристый теплообменник Т-1, где нагревается до температуры 12 °С и при давлении 1,9 МПа направляется на границу установки в качестве товарного продукта. Конденсат из емкости Е-1 направляется на орошение колонны.

Кубовый продукт колонны К-4 охлаждается в теплообменнике Т-3 от 75 °С до 32 °С за счет фракции  $C_{2+}$  из колонны деметанизации. При недостаточном охлаждении кубовый продукт дополнительно охлаждается в аппарате воздушного охлаждения АВО-1. Далее ШФЛУ направляется на установку очистки и газофракционирования ШФЛУ.

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
|      |      |          |         |      |                       | 44   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       |      |

### 2.3 Модернизация установки выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси

Существуют различные методы модернизаций технологического процесса переработки газа, с целью увеличения отбора целевых компонентов. Одним из способов является внедрение мембранной установки для выделения азотно-гелиевой смеси из природного газа.

Данная модернизация позволяет упростить аппаратное оформление процесса за счет того, что можно убрать колонны для концентрирования азотно-гелиевой смеси и подпитки хладагента. Также повышается энергоэффективность процесса за счет меньших затрат на электроэнергию для проведения процесса.

Мембранные процессы разделения характеризуются различным коэффициентом проницаемости компонентов газа по отношению к мембране. На рисунке 13 приведена шкала скорости проницания компонентов природного газа через мембрану, изготовленную из полимерного материала [43].



Рисунок 13 – Шкала скорости проницания компонентов природного газа через полимерную мембрану

Из представленного рисунка 13 можно сделать вывод, что He легче проникает через мембрану, чем другие компоненты. Необходимо также учитывать, что следует выделять не только гелий, но и азот, который в дальнейшем будет использоваться в нуждах завода и в производстве сжиженного природного газа.

Для выделения азотно-гелиевой смеси предлагается установить одностадийный мембранный модуль для концентрирования He до 6,59 % мол. [44].

Рассмотрим два способа внедрения мембранной установки в технологи-

ческий процесс для выделения азотно-гелиевой смеси.

### 2.3.1 Внедрение мембранного модуля на установке выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси

Технологическая схема с мембранным модулем на границе установки приведена на рисунке 14.

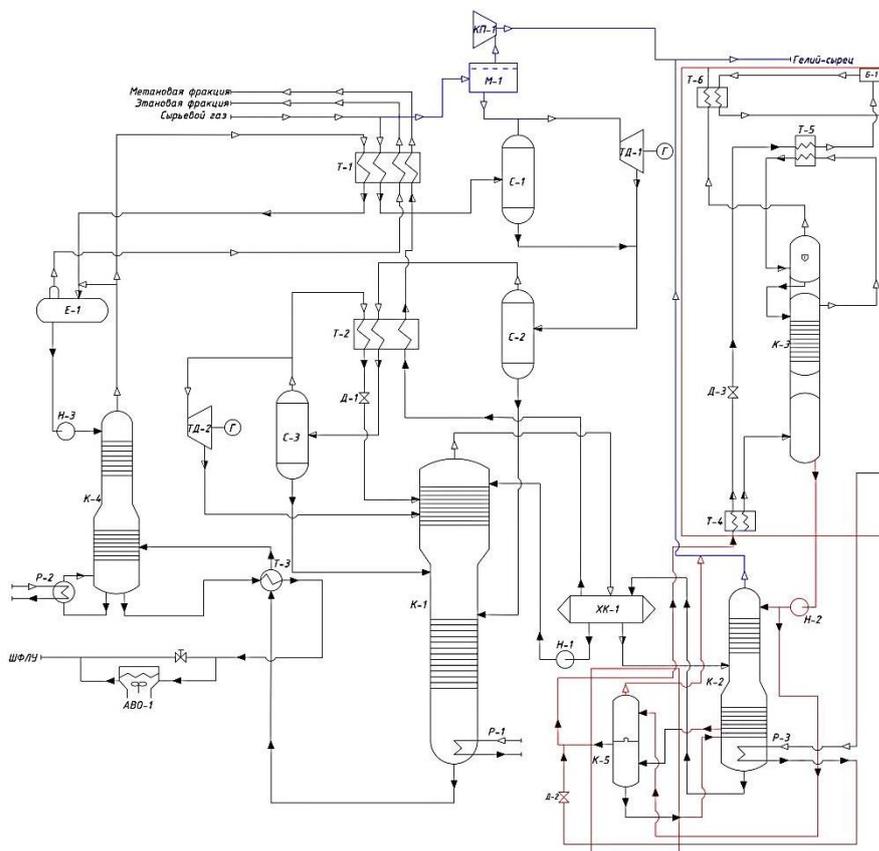


Рисунок 14 – Модернизация установки выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси (вариант 1):

Т-1-2-4-5-6 – пластинчато-ребристые теплообменники; Т-3 – рекуперативный теплообменник; С-1-2-3 – сепаратор; ТД-1-2 – турбодетандер; Г – генератор; Д-1-2-3 – дроссели; К-1 – колонна деметанизации; К-2 – колонна для извлечения азотно-гелиевой смеси; К-3 – колонна для концентрирования азотно-гелиевой смеси; К-4 – колонна дэтанизации; К-5 – колонна подпитки хладагента; Р-1 – ребойлер куба деметанизатора; Р-2 – ребойлер куба дэтанизатора; Р-3 – ребойлер куба колонны для извлечения азотно-гелиевой смеси; ХК-1 – холодильник-конденсатор; Е-1 – емкость для этанового дистиллята; Н-1-2-3 – насос; АВО-1 – аппарат воздушного охлаждения; М-1 – мембранный модуль; КП-1 – компрессор

|      |      |          |         |      |  |  |  |  |      |
|------|------|----------|---------|------|--|--|--|--|------|
|      |      |          |         |      |  |  |  |  | Лист |
|      |      |          |         |      |  |  |  |  | 46   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |  |  |  |  |      |

ВКР.19234.1.180301.ПЗ

Газ с содержанием 0,4 % мол. гелия направляется на мембранную установку. Пройдя мембранный модуль, пермеат с содержанием не менее 6,59 % мол. гелия направляется в компрессор, где сжимается до 2,4 МПа, затем выводится с установки и направляется на дальнейшую переработку, а ре-тант направляется на расширение в турбодетандер ТД-1.

Таким образом, можно сделать вывод, что из схемы можно убрать колонны для концентрирования азотно-гелиевой смеси, так как азотно-гелиевая смесь выделяется непосредственно на мембранной установке и в дальнейшем направляется на установку очистки, сжижения и затаривания гелия.

Для обоснования модернизации проведем расчет мембранной установки.

Исходные данные:

Концентрация гелия в исходном газе – 0,4 % мол.;

Концентрация гелия в пермеате – 6,59 % мол.;

Количество подаваемого газа – 668000 кг/ч;

Толщина мембраны – 1 мкм;

Давление до мембраны – 7,25 МПа;

Температура – 13 °С.

Для расчета мембраны необходимо определить рабочую поверхность мембраны и ее производительность.

Мембранное разделение газа подчиняется законам массопередачи. Массовый поток  $Q$  вещества определяется уравнение:

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

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

$S$  – рабочая поверхность мембраны, м<sup>2</sup>;

$K_M$  – коэффициент проницаемости по гелию, (моль·м)/(м<sup>2</sup>·с·Па);

$d$  – толщина мембраны, мкм;

$\Delta P$  – движущая сила процесса мембранного разделения, кПа.

Из формулы (1) определим рабочую поверхность мембраны:

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 47   |



Технологическая схема с вариантом установки мембранного модуля после колонны деметанизации приведена на рисунке 15.

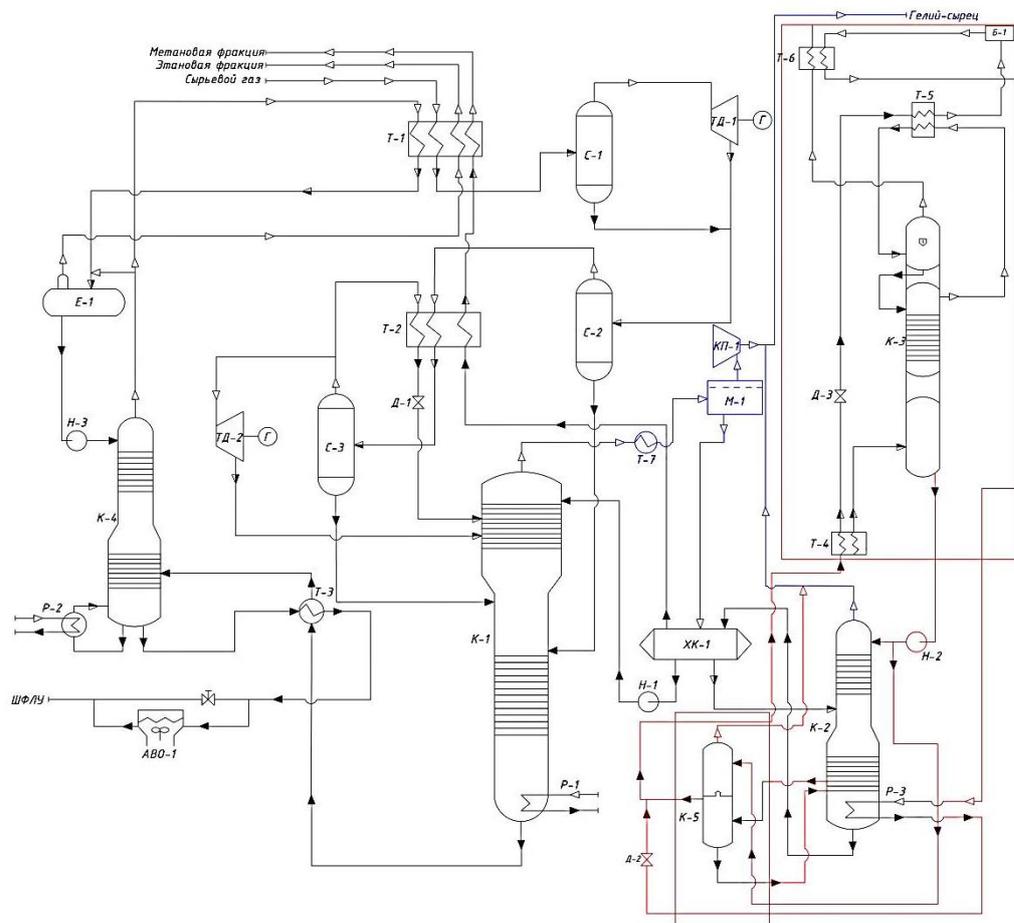


Рисунок 15 – Модернизация установки выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси (вариант 2):

Т-1-2-4-5-6 – пластинчато-ребристые теплообменники; Т-3 – рекуперативный теплообменник; Т-7 – теплообменник; С-1-2-3 – сепаратор; ТД-1-2 – турбодетандер; Г – генератор; Д-1-2-3 – дроссели; К-1 – колонна деметанизации; К-2 – колонна для извлечения азотно-гелиевой смеси; К-3 – колонна для концентрирования азотно-гелиевой смеси; К-4 – колонна деэтанализации; К-5 – колонна подпитки хладагента; Р-1 – ребойлер куба деметанизатора; Р-2 – ребойлер куба деэтанализатора; Р-3 – ребойлер куба колонны для извлечения азотно-гелиевой смеси; ХК-1 – холодильник-конденсатор; Е-1 – емкость для этанового дистиллята; Н-1-2-3 – насос; АВО-1 – аппарат воздушного охлаждения; М-1 – мембранный модуль; КП-1 – компрессор

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |
|------|------|----------|---------|------|

ВКР.19234.1.180301.ПЗ

Лист

49

Для определения эффективности варианта установки мембранного модуля после колонны деметанизации проведем расчет мембранной установки.

Исходные данные:

Концентрация гелия в исходном газе – 0,4 % мол.;

Концентрация гелия в пермеате – 6,59 % мол.;

Количество подаваемого газа – 555000 кг/ч;

Толщина мембраны – 1 мкм;

Давление до мембраны – 2,8 МПа;

Температура – минус 98 °С.

Для расчета мембраны необходимо определить рабочую поверхность мембраны и ее производительность.

Мембранное разделение газа подчиняется законам массопередачи. Массовый поток  $Q$  вещества определяется уравнение:

$$Q = \frac{K_M \cdot S \cdot \Delta P}{d}, \quad (5)$$

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

$S$  – рабочая поверхность мембраны, м<sup>2</sup>;

$K_M$  – коэффициент проницаемости по гелию, (моль·м)/(м<sup>2</sup>·с·Па);

$d$  – толщина мембраны, мкм;

$\Delta P$  – движущая сила процесса мембранного разделения, кПа.

Из формулы (5) определим рабочую поверхность мембраны:

$$S = \frac{K_M \cdot Q \cdot \Delta P}{d}, \quad (6)$$

Коэффициент проницаемости по гелию  $K_M$  при переносе через мембрану равен  $7,8 \cdot 10^{-15}$  (моль·м)/(м<sup>2</sup>·с·Па).

Определим движущую силу мембранного разделения систем:

$$\Delta P = P_1 - P_2, \quad (7)$$

где  $P_1$  – рабочее давление до мембраны, кПа;

$P_2$  – избыточное давление после мембраны, кПа.

$$\Delta P = 2800 - 2400 = 400 \text{ кПа}$$

Тогда рабочая поверхность мембраны:

$$S = \frac{555000 \cdot 7,8 \cdot 10^{-15} \cdot 400}{1 \cdot 10^{-6}} = 2,59 \text{ м}^2$$

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

Удельная производительность мембраны определяется по формуле:

$$G = \frac{V}{S}, \quad (8)$$

где  $V$  – объем пермеата,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$S$  – поверхность мембраны,  $\text{м}^2$ .

Плотность пермеата будет складываться из плотности гелия и азота.

Плотность пермеата составляет  $0,1845 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Тогда объемный расход пермеата составляет  $3\,008\,130 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Удельная производительность мембраны:

$$G = \frac{3\,008\,130}{5} = 601\,626 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Результаты расчетов представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты расчета мембранной установки

| Вариант установки мембранного модуля | Перепад давления, $\Delta P$ , кПа | Рабочая поверхность, $S$ , $\text{м}^2$ | Удельная производительность, $G$ , $\text{м}^3/\text{ч}$ |
|--------------------------------------|------------------------------------|---|--|
| На границе установки                 | 4850                               | 29                                      | 128848,1   |
| После колонны деметанизации          | 400                                | 5                                       | 601626,0   |

Проанализировав результаты, представленные в таблице 4, можно сделать вывод, что при установке мембранного модуля на границе установки площадь мембраны будет достаточно велика, по сравнению с установкой мембраны после колонн деметанизации. Это обусловлено тем, что количество подаваемого газа по первому варианту в 1,2 раза выше, чем во втором варианте.

Целесообразно установить мембранный модуль после колонны деметанизации, но при этом следует учитывать, что газ необходимо предварительно

нагреть от температуры минус 98 °С до 1 °С, для чего необходимо предусмотреть дополнительное теплообменное оборудование.

### 2.3.3 Технико-экономическое обоснование модернизации

Основными показателями для принятия мембранной установки к реализации являются затраты на оборудование, а также экономический эффект, который определяется в сравнении себестоимости производства одной тонны гелиевого концентрата по мембранной и криогенной технологии [45].

В состав предлагаемой мембранной установки входят мембранный модуль, теплообменник для подогрева газа, компрессор для подачи газа в трубопровод.

В качестве поставщиков мембранного оборудования приведем компанию GENERON. Компания является мировым лидером по производству некриогенного оборудования. Модули изготавливают из полуволоконных мембран.

Стоимость мембраны за 1 м<sup>2</sup> составляет около 60 000 руб. Исходя из данных производителя мембраны GENERON рассчитаем капитальные затраты на оборудование:

Капитальные затраты на оборудование определяется по формуле:

$$K_{об} = A \cdot S_M + S_1 + S_2, \quad (9)$$

где  $A$  – площадь используемой мембраны, м<sup>2</sup>;

$S_M$  – стоимость 1 м<sup>2</sup> мембраны, руб.;

$S_1$  – стоимость компрессорной установки, руб.;

$S_2$  – стоимость теплообменного оборудования, руб.

Стоимость компрессоров варьируется в широком диапазоне и зависит от требуемой мощности. Примем 1 кВт – 60 000 руб. Тогда стоимость компрессорной установки в среднем будет 12 900 000 руб.

Стоимость теплообменного оборудования составит 7 456 000 руб.

Тогда капитальные затраты на оборудование составят:

$$K_{об} = 5 \cdot 60\,000 + 12\,900\,000 + 7\,456\,000 = 20\,656\,000 \text{ руб.}$$

Себестоимость выделения тонны гелиевого концентрата из природного газа с использованием мембранного модуля определяется по формуле:

$$C_{He} = \frac{(P \cdot T \cdot E) + (0,2 \cdot K_{об})}{F_{He} \cdot T}, \quad (10)$$

где  $C_{He}$  – стоимость выделения гелиевого концентрата, руб./ тонна He;

$P$  – мощность, развиваемая компрессором, кВт;

$T$  – коэффициент функционирования снабжающей электростанции, ч/год;

$E$  – стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч;

$K_{об}$  – капитальные затраты на оборудование, руб.;

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

Мощность, развиваемая компрессором, является технической характеристикой оборудования. Для предлагаемого оборудования составляет 215 кВт.

Коэффициент функционирования снабжающей электростанции примем 7098 ч/год, с учетом остановок для проведения ремонтных работ.

Стоимость электроэнергии для данных условий составляет 5,88 руб./кВт·ч.

Тогда себестоимость выделения тонны гелиевого концентрата из природного газа с использованием мембранного модуля:

$$C_{He} = \frac{(215 \cdot 7098 \cdot 5,88) + (0,2 \cdot 20\,656\,000)}{2,5 \cdot 7098} = 738,41 \text{ руб./тонна He}$$

Стоимость 738,41 руб./тонна He не может являться окончательной, так как на данной установке выполняется выделение не чистого гелия, а его концентрата. Вследствие этого конечная стоимость чистого гелия за одну тонн увеличится примерно в 2 – 4 раза за счет процесса низкотемпературной адсорбции и составит 2815 руб. за 1 тонну гелия.

Для сравнения стоимость одной тонны гелиевого концентрата, выделяемого с помощью оборудования компании Криогенмаш, составляет примерно 6590 руб., за счет более значительных затрат на энергию, необходимую для функционирования процесса в оптимальном режиме и более дорогостоящего оборудования.

Чистый дисконтированный доход (NPV) – показатель, характеризующий какую прибыль принесет предлагаемый проект к концу расчетного периода с учетом временной стоимости денег [46].

NPV определяется по формуле:

$$NPV = \sum_{T=0}^{T_{\text{расч.}}} CF_T \cdot \frac{1}{(1+i)^T}, \quad (11)$$

где  $T_{\text{расч}}$  – расчетный период, год. Принимаем равным 8 годам.

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

$i$  – ставка дисконтирования, %. Принимаем равной текущей ключевой ставке ЦБ РФ равной 11 %.

Дисконтированный срок окупаемости (DPP) – показатель, характеризующий через какой период времени NPV станет положительным и проект начнет приносить прибыль.

$$DPP = \sum_{T=0}^{T_{\text{расч.}}} CF_T \cdot \frac{1}{(1+i)^T} \geq K, \quad (12)$$

где  $K$  – капитальные вложения, руб.

Поток платежей рассчитывается по формуле:

$$CF_T = D_T - K - И_T, \quad (13)$$

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

$И_T$  – общие эксплуатационные издержки в год, руб.

Доходом является стоимость произведенного гелиевого концентрата:

$$D_T = C_{He} \cdot G_{\text{год}}, \quad (14)$$

где  $C_{He}$  – себестоимость выделения гелиевого концентрата, руб./тонна He;

$G_{\text{год}}$  – производительность мембранного модуля, кг/ч.

$$D_T = 738,41 \cdot 555\,000 = 409\,817\,550 \text{ руб.}$$

Капитальные вложения определяются по следующей формуле:

$$K = K_{\text{об}} + K_{\text{пост}} + K_{\text{пр}}, \quad (15)$$

где  $K_{\text{об}}$  – капитальные вложение на закупку основного оборудования, руб.;

$K_{\text{пост}}$  – постоянная часть затрат на строительные и наладочные работы руб. Принимаем равными 20 % от затрат на оборудование.

$K_{\text{пр}}$  – прочие неучтенные затраты, руб. Принимаем равными 10 % от затрат на оборудование.

Тогда капитальные вложения составляют:

$$K = 20\,656\,000 + 4\,131\,200 + 2\,065\,600 = 26\,852\,800 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные издержки включают затраты на электроэнергию, затраты на ремонт и обслуживание установки, амортизационные отчисления.

Расходы на электроэнергию рассчитывают по формуле:

$$I_{\text{ЭН}} = E \cdot P_{\text{ном}} \cdot T \cdot k_w, \quad (16)$$

где  $E$  – стоимость электроэнергии, составляет 5,88 руб./кВт · ч;

$P_{\text{ном}}$  – суммарная номинальная мощность технологического оборудования, кВт;

$T$  – время работы производственной линии в течение года. Принимаем равным 8000 часов;

$k_w$  – коэффициент увеличения потребления электроэнергии, принимаем равным 12 %.

Тогда общие расходы на электроэнергию составляют:

$$I_{\text{ЭН}} = 5,88 \cdot 600 \cdot 8000 \cdot 1,12 = 31\,610\,880 \text{ руб.}$$

Затраты на ремонт и обслуживание определяются по формуле:

$$I_{\text{экс}} = K \cdot \alpha \cdot k_{\text{доп}}, \quad (17)$$

где  $\alpha = 0,1$  – ежегодные отчисления на ремонт и обслуживание производства гелия;

$k_{\text{доп}}$  – коэффициент, характеризующий повышение эксплуатационных затрат на обслуживание производства при увеличении производительности. Принимаем равным 1,2.

Тогда затраты на ремонт и обслуживание:

$$I_{\text{экс}} = 26\,852\,800 \cdot 0,1 \cdot 1,2 = 3\,222\,336 \text{ руб.}$$

Амортизационные отчисления вычисляются по следующей формуле:

$$I_{\text{ам}} = \frac{K_{\text{об}}}{T_{\text{об}}}, \quad (18)$$

где  $T_{\text{об}}$  – средний срок службы мембраны, принимаем 5 лет.

$$I_{\text{ам}} = \frac{20\,656\,000}{5} = 4\,131\,200 \text{ руб.}$$

Тогда эксплуатационные издержки:

$$I_{\text{т}} = 31\,610\,880 + 3\,222\,336 + 4\,131\,200 = 38\,964\,416 \text{ руб.}$$

Расчет основных инвестиционных показателей выполняется с помощью MS Excel. Принимаем, что капитальные вложения начисляются в течение трех лет.

На установленную производительность установка выйдет после пуско-наладочных работ на третий год. Результаты инвестиционных показателей приведены в таблице 8 и на рисунке 16.

Таблица 8 – Основные инвестиционные показатели проекта

| Показатель | Значение показателя | Условия                 |
|------------|---------------------|-------------------------|
| NPV, руб.  | 1 372 834 531       | NPV > 0                 |
| DPP, год   | 3                   | DPP < T <sub>расч</sub> |

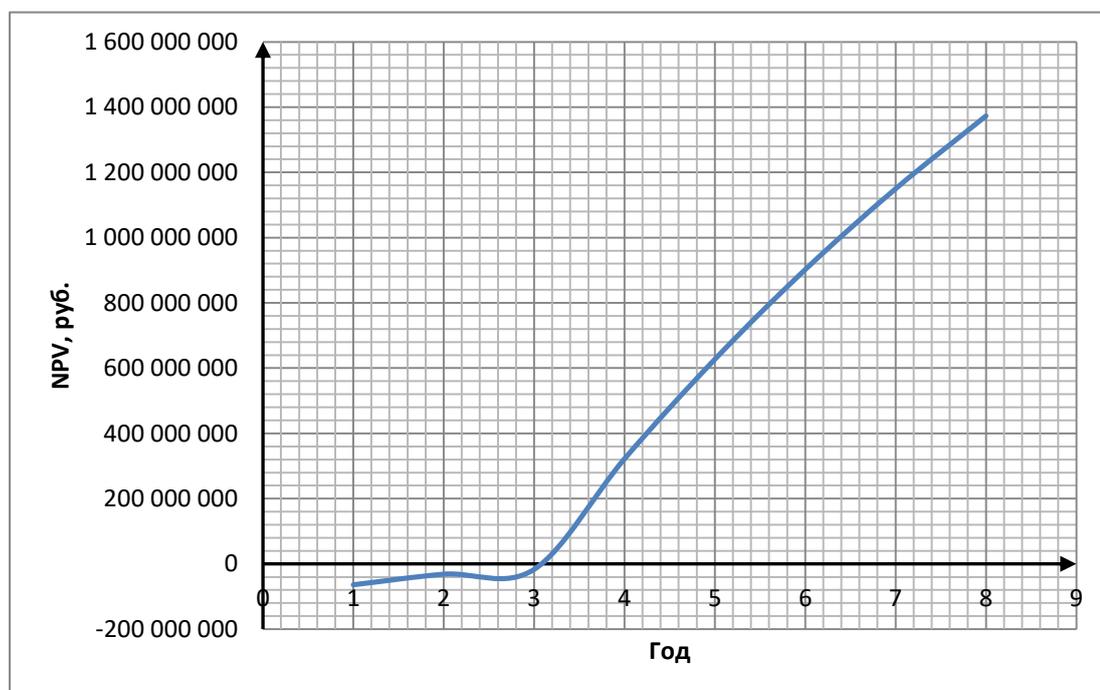


Рисунок 16 – Результаты экономического расчета по проекту

На основании графика можно сделать вывод, что DPP равен три года. Таким образом, так как NPV положителен и составляет 1 372 834 531 руб., и проект окупается через три года, то предложенный способ модернизации может быть рекомендован к реализации.

Для сравнения проведем расчет инвестиционных показателей проекта выделения гелиевого концентрата по криогенному методу. В состав установки входит дополнительная колонна для подпитки хладагента и колонна концентрирования азотно-гелиевой смеси соответственно, теплообменное оборудование и два клапана Джоуля-Томсона.

Себестоимость одной тонны гелиевого концентрата, выделенного по криогенному методу, составляет 6590 руб. Производительность установки составляет 668 000 кг/ч.

По формуле (14) рассчитаем доход

$$D_T = 6590 \cdot 668\,000 = 4\,402\,120\,000 \text{ руб.}$$

Стоимость одной клапанной тарелки составляет около 150 000 руб. Суммарная стоимость контактных устройств в колонне для концентрирования азотно-гелиевой смеси составит 10 800 000 руб.

Стоимость контактных устройств в колонне подпитки хладагента составляет около 950 000 руб. Стоимость двух ректификационных колонн составляет 27 000 000 руб.

Стоимость клапанов Джоуля-Томсона составляет 3 000 000 руб. Стоимость теплообменного оборудования 15 000 000 руб.

Тогда капитальные затраты на оборудование составят:

$$K_{об} = 10\,800\,000 + 950\,000 + 27\,000\,000 + 3\,000\,000 + 15\,000\,000 = 56\,750\,000 \text{ руб.}$$

Затраты на строительные и наладочные работы составляют 20 % от затрат на оборудование – 11 350 000 руб. Прочие неучтенные затраты составляют 10 % от затрат на оборудование – 5 675 000 руб.

Тогда капитальные вложения по формуле (15) составят:

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
|      |      |          |         |      |                       | 57   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       |      |

$$K = 56\,750\,000 + 11\,350\,000 + 5\,675\,000 = 73\,775\,000 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные издержки включают затраты на электроэнергию, затраты на ремонт и обслуживание установки, амортизационные отчисления.

Расходы на электроэнергию рассчитывают по формуле (16):

$$I_{\text{ЭН}} = 5,88 \cdot 7600 \cdot 8000 \cdot 1,12 = 400\,404\,480 \text{ руб.}$$

Затраты на ремонт и обслуживание определяются по (17) формуле:

$$I_{\text{ЭКС}} = 73\,775\,000 \cdot 0,1 \cdot 1,2 = 8\,853\,000 \text{ руб.}$$

Амортизационные отчисления вычисляются по (18) формуле:

$$I_{\text{ам}} = \frac{56\,750\,000}{15} = 3\,783\,334 \text{ руб.}$$

Тогда эксплуатационные издержки:

$$I_{\text{Т}} = 400\,404\,480 + 8\,853\,000 + 3\,783\,334 = 413\,040\,814 \text{ руб.}$$

Расчет основных инвестиционных показателей выполняется с помощью MS Excel. Принимаем, что капитальные вложения начисляются в течение семи лет. Результаты инвестиционных показателей приведены в таблице 9 и на рисунке 17.

Таблица 9 – Основные инвестиционные показатели проекта

| Показатель | Значение показателя | Условия                 |
|------------|---------------------|-------------------------|
| NPV, руб.  | 3 046 265 873       | NPV > 0                 |
| DPP, год   | 7                   | DPP < T <sub>расч</sub> |

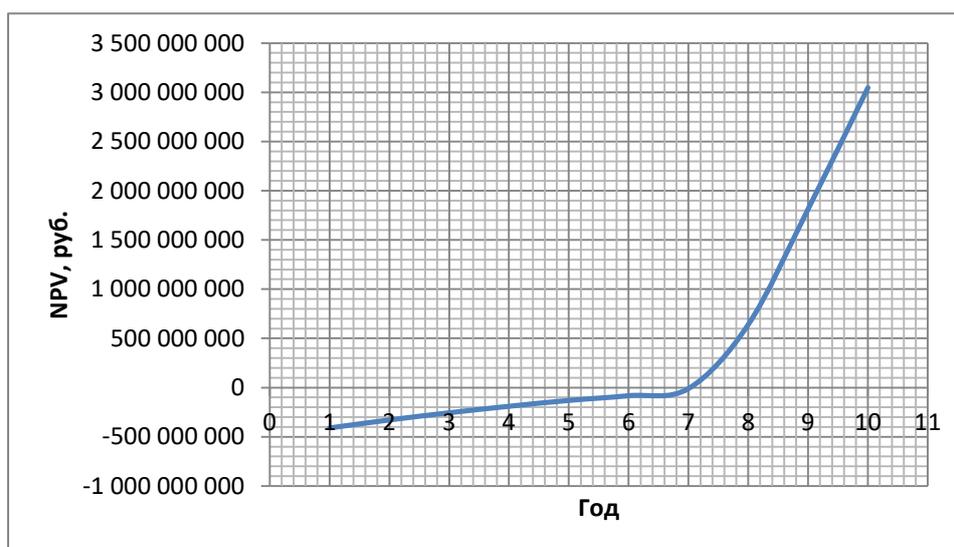


Рисунок 17 – Результаты экономического расчета по проекту

На основании графика можно сделать вывод, что DPP равен семи, что примерно в 2,5 раза больше чем при установке мембранного модуля. Стоимость электроэнергии, затрачиваемой при проведении криогенного выделения азотно-гелиевой смеси, составляет около 400 404 480 руб. Это приблизительно в 13 раз больше, чем при мембранном выделении азотно-гелиевой смеси.

Таким образом, можно сделать вывод, что технология с мембранным модулем является как энергетически, так и экономически выгодной.

Для более подробного определения технологической эффективности необходимо сравнить выход азотно-гелиевой смеси по мембранной технологии и криогенному методу, для этого рассчитаем материальный баланс установки.

#### **2.4 Моделирование и расчет установки выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси из природного газа**

Для обоснования эффективности модернизации проведем моделирование и расчет базового варианта выделения азотно-гелиевой смеси по криогенному методу.

Расчет выполнен с помощью программного обеспечения, который позволяет спроектировать данные установки, определить оптимальный режим работы аппаратов, рассчитать размеры оборудования и материальные потоки процесса.

На установку выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси природный газ поступает при температуре 13 °С и под давлением 7,25 МПа. Состав сырьевого газа приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Состав сырьевого газа, поступающего на установку

| Компонент | Химическая формула               | % мол.  | % масс. |
|-----------|----------------------------------|---------|---------|
| 1         | 2                                | 3       | 4       |
| Метан     | CH <sub>4</sub>                  | 85,4300 | 74,1067 |
| Этан      | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>    | 5,1900  | 8,4380  |
| Пропан    | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>    | 2,5600  | 6,1039  |
| н-Бутан   | n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,2200  | 0,6914  |
| и-Бутан   | i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,3600  | 1,1314  |

| 1                | 2                                | 3        | 4        |
|------------------|----------------------------------|----------|----------|
| н-Пентан         | n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,0400   | 0,1560   |
| и-Пентан         | i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,0700   | 0,2731   |
| н-Гексан         | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>   | 0,0400   | 0,1864   |
| н-Гептан         | C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>   | 0,0100   | 0,0541   |
| н-Октан          | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>   | 0,0025   | 0,0154   |
| н-Нонан          | C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>   | 0,0006   | 0,0000   |
| н-Декан          | C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>  | 0,0001   | 0,0000   |
| Гелий            | He                               | 0,4000   | 0,0009   |
| Водород          | H <sub>2</sub>                   | 0,0640   | 0,0001   |
| Азот             | N <sub>2</sub>                   | 5,3318   | 8,1763   |
| Метанол          | CH <sub>3</sub> OH               | 0,0010   | 0,0000   |
| Диоксид углерода | CO <sub>2</sub>                  | 0,2800   | 0,6663   |
| Итого            | —                                | 100,0000 | 100,0000 |

Расход сырьевого газа составляет 668000 кг/ч.

Свойства исходного материального потока приведены на рисунке 18.

| Таблица             | Название потока                           | Сырьевой газ | Паровая фаза |
|---------------------|---|--------------|--------------|
| Условия             | Паровая / фазовая фракция                 | 1,0000       | 1,0000       |
| Свойства            | Температура [С]                           | 13,00        | 13,00        |
| Состав              | Давление [МПа]                            | 7,250        | 7,250        |
| Подача нефти и газа | Молярный расход [kgmole/h]                | 3,939e+004   | 3,939e+004   |
| Проба нефтепродукта | Масс. расход [kg/h]                       | 6,680e+005   | 6,680e+005   |
| Конст. равн.        | Станд. объем. расх. ид. жидк. [m3/h]      | 2120         | 2120         |
| Пользов.перемен.    | Молярная энтальпия [kJ/kgmole]            | -7,373e+004  | -7,373e+004  |
| Прим.               | Молярная энтропия [kJ/kgmole-С]           | 143,7        | 143,7        |
| Парам. стоим.       | Тепловой поток [kJ/h]                     | -2,904e+009  | -2,904e+009  |
| Нормализ. выходы    | Объем. расх. жидк. при станд. усл. [m3/h] | 9,289e+005   | 9,289e+005   |
| Выбросы             | Пакет флюида                              | Basis-1      |              |
|                     | Тип утилиты                               |              |              |

OK

Рисунок 18 – Свойства материального потока газа

Модель базового варианта схемы установки криогенного выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси из природного газа приведена на рисунке 19.

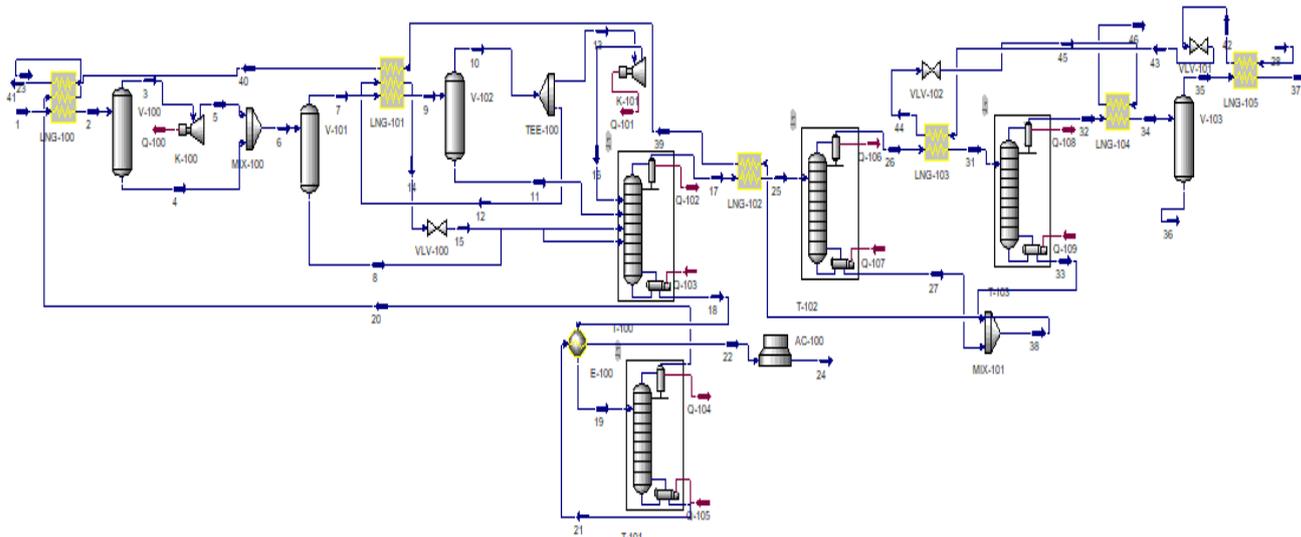


Рисунок 19 – Базовая схема установки криогенного выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси из природного газа

Материальный баланс модели базовой установки приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Материальный баланс базовой установки

| Приход |        |           | Расход            |        |           |
|--------|--------|-----------|-------------------|--------|-----------|
| Сырье  | % мол. | кг/ч      | Продукт           | % мол. | кг/ч      |
| ПГ     | 100,00 | 668000,00 | Метановая фракция | 81,99  | 547700,00 |
|        |        |           | Этановая фракция  | 8,30   | 55440,00  |
|        |        |           | ШФЛУ              | 8,61   | 57500,00  |
|        |        |           | АГ смесь          | 1,10   | 7360,00   |
| Итого  | 100,00 | 668000,00 | Итого             | 100,00 | 668000,00 |

Составы потоков приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Состав потоков

| Компонент | Поток, % мол.     |                  |        |                       |
|-----------|-------------------|------------------|--------|-----------------------|
|           | Метановая фракция | Этановая фракция | ШФЛУ   | Азотно-гелиевая смесь |
| 1         | 2                 | 3                | 4      | 5                     |
| Метан     | 93,570            | 0,000            | 0,000  | 0,002                 |
| Этан      | 0,180             | 99,820           | 0,000  | 0,000                 |
| Пропан    | 0,000             | 0,180            | 77,410 | 0,000                 |
| н-Бутан   | 0,000             | 0,000            | 10,930 | 0,000                 |
| и-Бутан   | 0,000             | 0,000            | 6,680  | 0,000                 |
| н-Пентан  | 0,000             | 0,000            | 2,130  | 0,000                 |
| и-Пентан  | 0,000             | 0,000            | 1,210  | 0,000                 |

| 1                | 2       | 3       | 4       | 5       |
|------------------|---------|---------|---------|---------|
| н-Гексан         | 0,000   | 0,000   | 1,210   | 0,000   |
| н-Гептан         | 0,000   | 0,000   | 0,330   | 0,000   |
| н-Октан          | 0,000   | 0,000   | 0,080   | 0,000   |
| н-Нонан          | 0,000   | 0,000   | 0,020   | 0,000   |
| н-Декан          | 0,000   | 0,000   | 0,000   | 0,000   |
| Гелий            | 0,000   | 0,000   | 0,000   | 6,590   |
| Водород          | 0,000   | 0,000   | 0,000   | 1,055   |
| Азот             | 5,620   | 0,000   | 0,000   | 92,353  |
| Метанол          | 0,000   | 0,000   | 0,000   | 0,000   |
| Диоксид углерода | 0,630   | 0,000   | 0,000   | 0,000   |
| Итого            | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |

Содержание гелия в азотно-гелиевой смеси 6,59 % мол.

Модель варианта схемы криогенного выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси с мембранным модулем после колонны деметанзации приведена на рисунке 20.

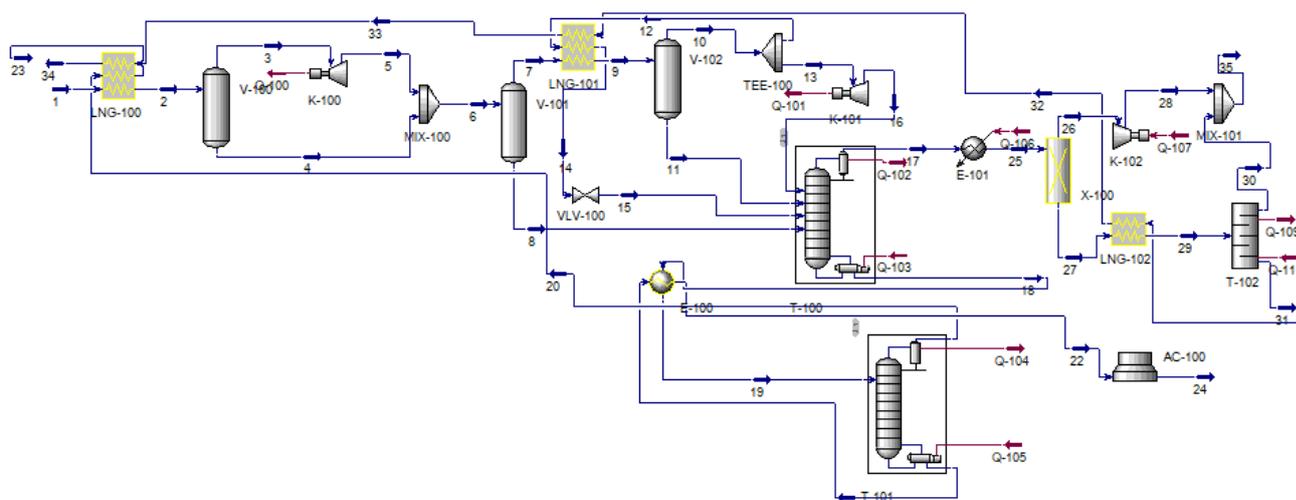


Рисунок 20 – Схема криогенного выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси с мембранным модулем после колонны деметанзации

Проведем расчет материального баланса мембранного модуля.

Материальный баланс мембранных процессов по потокам имеет вид:

$$L_0 = L + W, \quad (19)$$

где  $L_0$  – количество исходно потока, кг/ч. Принимаем 555 000 кг/ч.

$L$  – расход ретанта, кг/ч;

$W$  – расход пермеата, кг/ч.

Материальный баланс по компоненту определяется по формуле:

$$L_0 \cdot c_0 = L \cdot c_1 + W \cdot c_2, \quad (20)$$

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

$c_1$  – концентрация азота в ретанте, % мол.;

$c_2$  – концентрация азота в пермеате, % мол.

Содержание азота в исходном потоке газа принимаем равным 5,3318 % мол. Содержание азота в пермеате должно составлять 92,350 % мол. Содержание азота в ретанте составляет 4,170 % мол.

Выход пермеата рассчитывается по формуле:

$$W = L_0 - L, \quad (21)$$

Подставим уравнение (21) в формулу (20), тогда уравнение материального баланса будет иметь вид:

$$L_0 \cdot c_0 = L \cdot c_1 + (L_0 - L) \cdot c_2, \quad (22)$$

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

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

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

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

Тогда расход ретанта составляет:

$$L = \frac{555\,000(0,0533 - 0,9235)}{(0,0417 - 0,9235)} = \frac{555\,000 \cdot (-0,8702)}{-0,8818} = \frac{-482\,961}{-0,8818} = 547\,699 \text{ кг/ч.}$$

Тогда выход пермеата:

$$W = 555\,000 - 547\,699 = 7\,301 \text{ кг/ч.}$$

Правильность материального баланса определяется выполнением условия уравнения (19)

$$555\,000 = 547\,699 + 7\,301 \text{ кг/ч}$$

$$555\,000 = 555\,000 \text{ кг/ч}$$

Материальный баланс найден правильно.

Материальный баланс мембранного модуля приведен в таблице 13.

Таблица 13 – Материальный баланс мембранного модуля

| Приход |        |           | Расход            |        |           |
|--------|--------|-----------|-------------------|--------|-----------|
| Сырье  | % мол. | кг/ч      | Продукт           | % мол. | кг/ч      |
| ПГ     | 100,00 | 555000,00 | Метановая фракция | 98,68  | 547699,00 |
|        |        |           | АГ смесь          | 1,32   | 7301,00   |
| Итого  | 100,00 | 555000,00 | Итого             | 100,00 | 555000,00 |

Составы потоков после мембранного модуля приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Состав потоков

| Компонент        | Поток, % мол.     |                       |
|------------------|-------------------|-----------------------|
|                  | Метановая фракция | Азотно-гелиевая смесь |
| Метан            | 95,020            | 0,000                 |
| Этан             | 0,180             | 0,000                 |
| Пропан           | 0,000             | 0,000                 |
| н-Бутан          | 0,000             | 0,000                 |
| и-Бутан          | 0,000             | 0,000                 |
| н-Пентан         | 0,000             | 0,000                 |
| и-Пентан         | 0,000             | 0,000                 |
| н-Гексан         | 0,000             | 0,000                 |
| н-Гептан         | 0,000             | 0,000                 |
| н-Октан          | 0,000             | 0,000                 |
| н-Нонан          | 0,000             | 0,000                 |
| н-Декан          | 0,000             | 0,000                 |
| Гелий            | 0,000             | 6,610                 |
| Водород          | 0,000             | 1,035                 |
| Азот             | 4,170             | 92,355                |
| Метанол          | 0,000             | 0,000                 |
| Диоксид углерода | 0,630             | 0,000                 |
| Итого            | 100,000           | 100,000               |

Содержание гелия в азотно-гелиевой смеси составляет 6,61 % мол., что соответствует необходимым требованиям по содержанию гелия в азотно-гелиевой смеси.

Таким образом, так как содержание гелия в пермеате соответствует нормативным значениям, можно сделать вывод, что установка мембранного модуля также является технологически эффективной.

## 2.5 Модернизация способа охлаждения газа

Одним из способов увеличения выделения гелия является установка дросселирующих устройств для дополнительного охлаждения газа. При этом понижение температуры достигается в перепаде давления в двух дросселирующих устройствах.

Технологическая схема получения гелия по криогенному методу с охлаждением газа в двух дросселирующих устройствах приведена на рисунке 21.

Предположительно с помощью такой модернизации можно увеличить степень извлечения метана и азотно-гелиевой смеси.

Метановая фракция после холодильника-конденсатора ХК-1 дросселируется Д-2 до давления 2,6 МПа и поступает в колонну К-2, где в основном отделяется метан с некоторым содержанием азота. Сверху колонны К-2 выделяется газ с содержанием гелия, который дальше направляется колонну К-3 для более четкого разделения метана и азотно-гелиевой смеси. Азотно-гелиевая смесь выделяется с верха колонны К-3 и направляется на дальнейшую переработку. Некоторая часть метана выводится с куба колонны К-3 и подается на орошение колонны К-2.

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 65   |



## 2.6 Моделирование и расчет модернизированного варианта установки выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси из природного газа

Для обоснования эффективности модернизации проведем моделирование и расчет установки модернизированного варианта (охлаждение газа в дросселирующих устройствах).

Сравнение базового и модернизированного варианта производится по следующему комплексу параметров:

- степень извлечения азотно-гелиевой смеси, метана, этана;
- содержание гелия в азотно-гелиевой смеси.

Характеристика продуктов, выделяемых на установке по базовому варианту, приведена в таблице 15.

Таблица 15 – Характеристика продуктов на выходе с установки

|                 | Метановая фракция | Этановая фракция | Широкая фракция легких углеводородов | Азотно-гелиевая смесь |
|-----------------|-------------------|------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| Температура, °С | 8                 | 12               | 32                                   | 35                    |
| Давление, МПа   | 1,7               | 1,7              | 1,8                                  | 2,4                   |

Степень извлечения продуктов представлена в таблице 16.

Таблица 16 – Степень извлечения продуктов из природного газа по базовому варианту

| Гелия – в азотно-гелиевой смеси, % масс. | Метана – в метановой фракции, % масс. | Этана – в этановой фракции, % масс. |
|--|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 80,25                                    | 97,99                                 | 96,47                               |

На следующем этапе получена модель технологической схемы модернизированного варианта с охлаждением газа в дополнительных дросселирующих устройствах, которая приведена на рисунке 22.

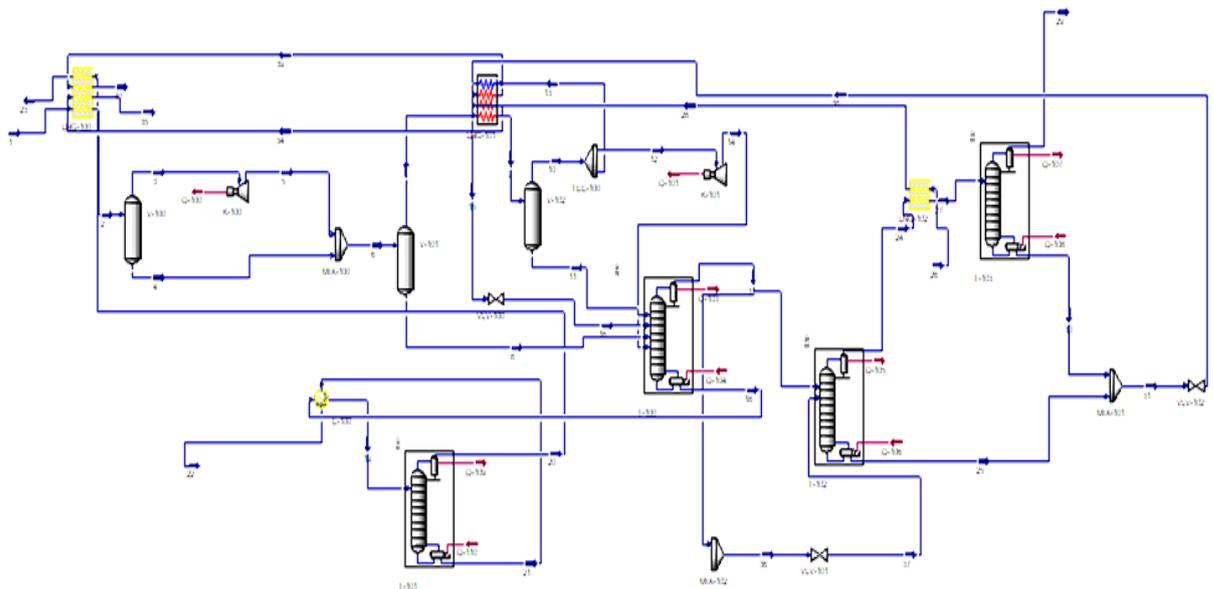


Рисунок 22 – Модернизированная схема установки выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси из природного газа

В дросселирующем устройстве Д-5 установим перепад давления 400 кПа. Параметры дросселирующего устройства указаны на рисунке 23.

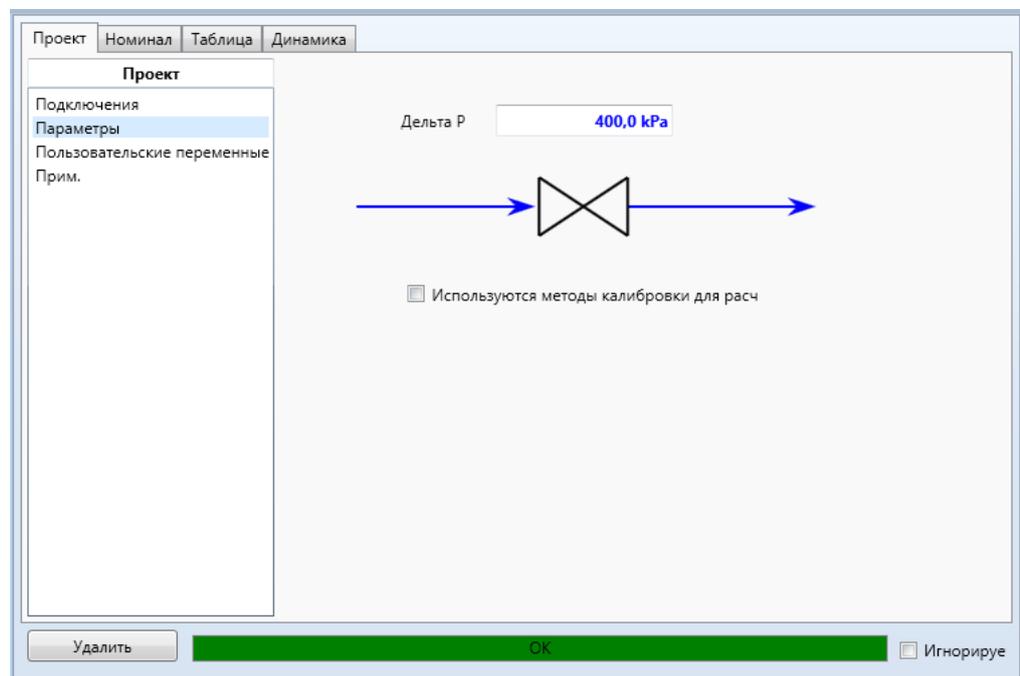


Рисунок 23 – Параметры дросселирующего устройства

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

ВКР.19234.1.180301.ПЗ

Материальный баланс спроектированной модернизированной установки приведен в таблице 17.

Таблица 17 – Материальный баланс модернизированной установки

| Приход |        |           | Расход            |        |           |
|--------|--------|-----------|-------------------|--------|-----------|
| Сырье  | % мол. | кг/ч      | Продукт           | % мол. | кг/ч      |
| ПГ     | 100,00 | 668000,00 | Метановая фракция | 82,32  | 549900,00 |
|        |        |           | Этановая фракция  | 8,44   | 56340,00  |
|        |        |           | ШФЛУ              | 7,69   | 51410,00  |
|        |        |           | АГ смесь          | 1,55   | 10350,00  |
| Итого  | 100,00 | 668000,00 | Итого             | 100,00 | 668000,00 |

Составы потоков приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Состав потоков

| Компонент        | Поток, % мол.     |                  |         |                       |
|------------------|-------------------|------------------|---------|-----------------------|
|                  | Метановая фракция | Этановая фракция | ШФЛУ    | Азотно-гелиевая смесь |
| Метан            | 95,460            | 0,000            | 0,000   | 0,002                 |
| Этан             | 0,100             | 99,820           | 0,000   | 0,000                 |
| Пропан           | 0,000             | 0,180            | 77,410  | 0,000                 |
| н-Бутан          | 0,000             | 0,000            | 10,930  | 0,000                 |
| и-Бутан          | 0,000             | 0,000            | 6,680   | 0,000                 |
| н-Пентан         | 0,000             | 0,000            | 2,130   | 0,000                 |
| и-Пентан         | 0,000             | 0,000            | 1,210   | 0,000                 |
| н-Гексан         | 0,000             | 0,000            | 1,210   | 0,000                 |
| н-Гептан         | 0,000             | 0,000            | 0,300   | 0,000                 |
| н-Октан          | 0,000             | 0,000            | 0,090   | 0,000                 |
| н-Нонан          | 0,000             | 0,000            | 0,040   | 0,000                 |
| н-Декан          | 0,000             | 0,000            | 0,000   | 0,000                 |
| Гелий            | 0,000             | 0,000            | 0,000   | 7,160                 |
| Водород          | 0,000             | 0,000            | 0,000   | 0,488                 |
| Азот             | 4,140             | 0,000            | 0,000   | 92,350                |
| Метанол          | 0,000             | 0,000            | 0,000   | 0,000                 |
| Диоксид углерода | 0,300             | 0,000            | 0,000   | 0,000                 |
| Итого            | 100,000           | 100,000          | 100,000 | 100,000               |

Содержание гелия в азотно-гелиевой смеси 7,16 % мол. Степень извлечения продуктов представлена в таблице 19.

Таблица 19 – Степень извлечения продуктов из природного газа

| Гелия – в азотно-гелиевой смеси, % масс. | Метана – в метановой фракции, % масс. | Этана – в этановой фракции, % масс. |
|--|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 85,23                                    | 99,99                                 | 96,47                               |

Сравнение содержания гелия в азотно-гелиевой смеси по двум вариантам представлены на рисунке 24.

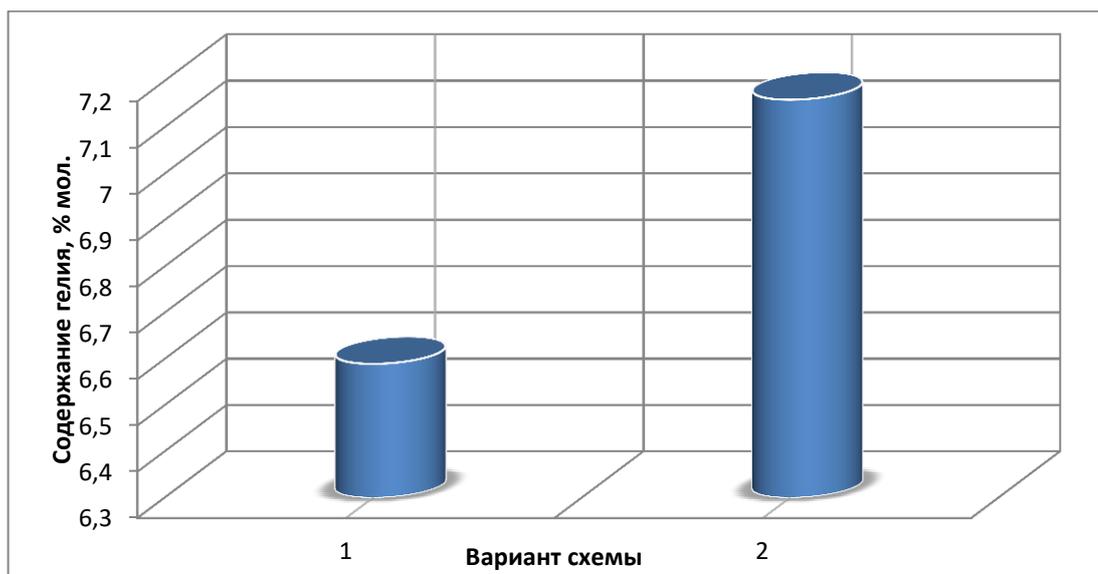


Рисунок 24 – Содержание гелия в азотно-гелиевой смеси

Таким образом, в результате модернизации способа охлаждения газа увеличивается содержание гелия в азотно-гелиевой смеси в 1,09 раза. Также при охлаждении газа в дросселирующих устройствах увеличивается содержание метана в метановой фракции в 1,02 раза. Таким образом, предлагаемый способ модернизации по созданию холода на установке выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси из природного газа эффективен и может быть реализован в реальном технологическом процессе.

При анализе работы можно сделать вывод, что установка мембранного модуля оказывает значительное влияние на энергоэффективность процесса, так как потребление энергии значительно сокращается, чем при проведении криогенного процесса.

### 3 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

#### 3.1 Воздействие на окружающую среду установки выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси

Процесс выделения этана, ШФЛУ и азотно-гелиевой смеси из природного газа относится к взрывоопасным и пожароопасным производствам. Основными факторами, определяющие опасность установки, являются:

- горючие газы (сырьевой газ, метановая фракция, этан);
- легковоспламеняющиеся и горючие жидкости (метанол);
- использование оборудования, работающего при больших давлениях, а также при очень низких температурах;
- электросиловое оборудование (насосы, компрессоры);
- разряд молний и статического электричества;
- возможное нарушение правил безопасности.

Основными источниками, влияющими на атмосферный воздух, являются выбросы углеводородных газов. Основным компонентом природного газа является метан, выбросы которого оказывают значительное влияние на парниковый эффект, вследствие которого наблюдается изменение климата данного региона. Выбросы могут происходить из-за негерметичности газопроводов или установок, либо из-за механических повреждений.

Для предотвращения выбросов, загрязняющих атмосферу, реализуется следующий комплекс мероприятий:

- все технологические процессы на установке осуществляются в закрытой, герметичной системе;
- оснащение данной установки современной системой контроля управления и автоматизации;

|                  |             |                      |                |             |  |                            |             |               |
|------------------|-------------|----------------------|----------------|-------------|--|----------------------------|-------------|---------------|
|                  |             |                      |                |             | <i>ВКР.19234.1.180301.ПЗ</i>   |                            |             |               |
| <i>Изм.</i>      | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i>      | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  |                            |             |               |
| <i>Разраб.</i>   |             | <i>Холодная Н.Е.</i> |                |             | <i>Повышение энергоэффективности процесса криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа на Амурском ГПЗ</i> | <i>Лит.</i>                | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> |
| <i>Провер.</i>   |             | <i>Гужель Ю.А.</i>   |                |             |  | <i>У</i>                   | <i>71</i>   | <i>82</i>     |
| <i>Реценз.</i>   |             |                      |                |             |  | <i>АМГУ ИФФ 918-об гр.</i> |             |               |
| <i>Н. Контр.</i> |             | <i>Родина Т.А.</i>   |                |             |  |                            |             |               |
| <i>Утверд.</i>   |             | <i>Гужель Ю.А.</i>   |                |             |  |                            |             |               |

- защита технологического оборудования, работающего под давлением;
- автоматический контроль дозрывных концентрации горючих паров в рабочих зонах;

- исключение непосредственного контакта работающего с вредными и опасными факторами.

Помимо выбросов углеводородных газов, может происходить утечка различных химических реагентов или смазочных материалов, которые негативно влияют на состояние гидросферы.

Для предупреждения негативного воздействия на водные ресурсы, подземные воды в период эксплуатации установки принят следующий комплекс мероприятий:

- оборудование на технологической установке должны быть оборудованы бортами

- площадки, на которых располагается оборудование, должны быть непроницаемыми для жидкости;

- подача сточных вод на очистные сооружения;

- осуществлять периодически осмотр состояния газопроводов и оборудования для выявления утечек.

Необходимо также проводить мониторинг почвенного покрова в соответствии с ГОСТ 17.4.3.04-85 «Охрана природы. Почвы. Общие требования к контролю и охране от загрязнений» [47]

Целью мониторинга является:

- оценка состояния почв;

- современное обнаружение изменений почвенного покрова.

### **3.2 Средства и системы защиты при эксплуатации установки**

В соответствии с «Межотраслевыми правилами обеспечения работников специальной защиты» утвержденными приказом Минздравсоцразвития России от 01.06.2009 № 290н осуществляется обеспечение работников специальной одеждой, обувью и другими средствами защиты [48].

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 72   |

Средства индивидуальной и коллективной защиты должны соответствовать ГОСТ 12.4.011-89 «Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация» [49].

Для защиты рабочего персонала от различных производственных опасностей применяют следующие методы:

- удаление работников на максимально допустимое расстояние от источника опасности;
- дистанционное управление технологическими процессами;
- применение средств коллективной защиты;
- применение средств индивидуальной защиты, которые обеспечивают защиту работника, непосредственно выполняющего работу на установке.

Средства защиты делятся на индивидуальные и коллективные. На предприятии применяют следующие средства защиты:

- дыхательные аппараты, автономные (SCABA) и неавтономные;
- пожарные рукава и одеяла;
- датчики обнаружения пожара;
- системы водяного орошения;
- лицевые щитки и макси;
- пожарные гидранты и лафетные стволы;
- системы тушения пожара углекислым газом;
- переносные огнетушители.

Уровень вибрации и шума на установках НТР не должен превышать допустимых норм.

Помимо этого на рабочий персонал может оказывать влияние технологическая вибрация, источниками которой являются насосы, компрессоры, электродвигатели, турбодетандеры. Защита от вибрации осуществляется в соответствии с ГОСТ 26568-85 «Вибрация Методы и средства защиты. Классификация» [50].

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 73   |

Также для снижения тяжести и напряженности трудового процесса необходимо организовать комплекс мероприятий, который будет обеспечивать рациональный трудовой процесс и эффективное использование предметов труда. Рабочее место организуется в соответствии ГОСТ 30.001-83 «Системы стандартов эргономики и технической эстетики. Основные положения» [51].

Рациональное устройство рабочего место учитывает следующие факторы:

- оптимальную планировку рабочего места;
- чередование работы с перерывами на отдых;
- степень автоматизации труда;
- удобное расположение материалов и инструментов.

Таким образом, при соблюдении всех факторов, значительно снижается утомляемость рабочих и повышается производительность труда, что приведет к минимальному риску возникновения аварийной ситуации.

|             |             |                 |                |             |                              |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|------------------------------|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>ВКР.19234.1.180301.ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |                              | 74          |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компоненты, выделяемые из природного газа, подвергаются дальнейшей переработке на газохимических и нефтехимических предприятиях. Количество выделяемого гелия является одним из важнейших критериев для оценки технологического развития страны

Поэтому дальнейшее развитие низкотемпературных процессов разделения природного газа становится актуальным вопросом. Одним из наиболее перспективным методом повышения энергоэффективности низкотемпературных процессов является их комбинация с мембранными установками.

В работе произведен подбор и проанализирована техническая документация и научная литература по низкотемпературным методам разделения природного газа с целью получения индивидуальных компонентов.

Изучена характеристика сырья и готовой продукции, а также технологическая схема криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа на Амурском ГПЗ. Приведены основные способы повышения энергоэффективности данного технологического процесса.

С применением программного обеспечения выполнено моделирование и расчет базового и модернизированных вариантов установок. Для подтверждения экономической эффективности выполнен технико-экономический расчет.

Рассмотрены основные факторы воздействия процесса на окружающую среду, а также рассмотрены средства и системы для защиты работников.

В графической части представлен чертеж установки криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа.

|                  |             |                      |                |             |  |                            |             |               |
|------------------|-------------|----------------------|----------------|-------------|--|----------------------------|-------------|---------------|
|                  |             |                      |                |             | <i>ВКР.19234.1.180301.ПЗ</i>   |                            |             |               |
| <i>Изм.</i>      | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i>      | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  |                            |             |               |
| <i>Разраб.</i>   |             | <i>Холодная Н.Е.</i> |                |             | <i>Повышение энергоэффективности процесса криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа на Амурском ГПЗ</i> | <i>Лит.</i>                | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> |
| <i>Провер.</i>   |             | <i>Гужель Ю.А.</i>   |                |             |  | <i>У</i>                   | <i>75</i>   | <i>82</i>     |
| <i>Реценз.</i>   |             |                      |                |             |  | <i>АМГУ ИФФ 918-об гр.</i> |             |               |
| <i>Н. Контр.</i> |             | <i>Родина Т.А.</i>   |                |             |  |                            |             |               |
| <i>Утверд.</i>   |             | <i>Гужель Ю.А.</i>   |                |             |  |                            |             |               |

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Ануров, С.А. Криогенные технологии разделения газов : моногр. / С.А. Ануров. – М. : ООО «АР-Консалт», 2017. – 233 с.

2 Бондарев, В.Л. Перспективы хранения природного газа, обогащенного гелием, в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке / В.Л. Бондарев, А.В. Чугунов, М.А. Саркисова, Е.В. Бондарев // Проблемы разработки и эксплуатации газовых, газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений. – 2015. – № 3 (23). – С. 63-67.

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

4 Хабибуллин, Р.Р. Эффективное использование внутренней энергии природного газа с целью увеличения степени извлечения углеводородной продукции на гелиевом заводе ООО «Газпром добыча Оренбург» / Р.Р. Хабибуллин, Д.В. Пантелеев, А.М. Сыркин // Башкирский химический журнал. – 2012. – № 3. – С. 63-66.

5 Ткачева, Т.А. Оптимизация технологического процесса установки низкотемпературной ректификации природного газа / Т.А. Ткачева, В.П. Ханин // Научный альманах. – 2016. – № 4. – С. 430-433.

6 Пат. 2580453 Российская Федерация, МПК F25J 3/02, Способ переработки природного углеводородного газа / И.А. Мнушкин, Е.В. Ерохин. – № 2015110573 ; Заявл. 25.03.2015 ; Оpubл. 10.04.2016, Бюл. № 10.

7 Столыпин, В.И. Увеличение отбора целевых компонентов из природного газа на Оренбургском гелиевом заводе / В.И. Столыпин // Башкирский научный журнал. – 2006. – Т. 13, № 4. – С. 80-87.

|                  |             |                      |                |             |  |                            |             |               |
|------------------|-------------|----------------------|----------------|-------------|--|----------------------------|-------------|---------------|
|                  |             |                      |                |             | <i>ВКР.19234.1.180301.ПЗ</i>   |                            |             |               |
| <i>Изм.</i>      | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i>      | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |  |                            |             |               |
| <i>Разраб.</i>   |             | <i>Холодная Н.Е.</i> |                |             | <i>Повышение энергоэффективности процесса криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа на Амурском ГПЗ</i> | <i>Лит.</i>                | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> |
| <i>Провер.</i>   |             | <i>Гужель Ю.А.</i>   |                |             |  | У                          | 76          | 82            |
| <i>Реценз.</i>   |             |                      |                |             |  | <i>АмГУ ИФФ 918-об гр.</i> |             |               |
| <i>Н. Контр.</i> |             | <i>Родина Т.А.</i>   |                |             |  |                            |             |               |
| <i>Утверд.</i>   |             | <i>Гужель Ю.А.</i>   |                |             |  |                            |             |               |

8 ИТС 50-2017. Переработка природного и попутного газа. – М : Бюро НДТ, 2017. – 222 с.

9 Дмитриевский, А.Н. Выделение гелия по новой технологии из сырьевых газов месторождений Сибири и Якутии с отправкой товарного газа экономичным способом / А.Н. Дмитриевский, В.В. Финько, В.Е. Финько // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2017. – № 2 (17). – С. 1-8.

10 Тверской, В.А. Мембранные процессы разделения. Полимерные мембраны: учеб. пособие / В.А. Тверской. – М. : МИТХТ им. М. В. Ломоносова, 2008. – 59 с.

11 Пат. 2574243 Российская Федерация, МПК В01D 53/00, Кластер по переработке природного газа с извлечением гелия / И.А. Мнушкин. – № 2014151176 ; Заявл. 17.12.2014 ; Оpubл. 10.02.2016, Бюл № 4.

12 Пат. 2459160 Российская Федерация, МПК F25J 3/00, Способ выделения этановой фракции / А.О. Шеин ; ОАО "НИПИгазпереработка". – № 2010136352 ; Заявл. 30.08.2010 ; Оpubл. 20.08.2012, Бюл. № 23.

13 Копша, Д.П. Исследование технологического процесса получения фракции C<sub>2+</sub> с целью повышения степени извлечения этана / Д.П. Копша, А.В. Оскирко // Научно-технический сборник. – 2015. – № 1. – С. 45-50.

14 Столыпин, В.И. Совершенствование процессов получения углеводородов из природного газа на Оренбургском гелиевом заводе : автореф. дис.... канд. техн. наук : 02.00.13 / В.И. Столыпин. – Уфа : Из-во Уфим. гос. нефт. техн. ун-та, 2007. – 24 с.

15 Русецкая, Г.Д. Проблемы и перспективы гелиевой промышленности России / Г.Д. Русецкая, А.А. Юрышев // Известия Байкальского государственного университета. – 2021. – Т. 31, № 4. – С. 448-457.

16 Мнушкин, И.А. Выбор целесообразной технологии модульных установок выделения гелия из природного газа / И.А. Мнушкин, Е.В. Ерохин, А.М. Сыркин // Химические технологии и продукты. – 2017. – С. 14-18.

17 Якуцени, В.П. Традиционные и перспективные области применения

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 77   |

гелия / В.П. Якуцени // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2009. – № 4. – С. 1-13.

18 Пат. 2597081 Российская Федерация, МПК В01D 53/00, Способ комплексного извлечения ценных примесей из природного гелийсодержащего углеводородного газа с повышенным содержанием азота / И.А. Мнушки. – № 2014153653 ; Заявл. 29.12.2014 ; Оpubл. 10.09.2016, Бюл. № 25.

19 Голубева, И.А. Гелий в России сегодня: проблемы и пути решения / И.А. Голубева [и др.] // Газовая промышленность. – 2021. – № 4 (815). – С. 70-78.

20 Милованов, С.В. Разработка и внедрение инновационной технологии извлечения гелия из природного газа / С.В. Милованов, Н.Н. Кисленко, А.Д. Тройников // Научный журнал Российского газового общества. – 2016. – № 2. – С. 10-17.

21 ТУ 51-940-80 Гелий газообразный (сжатый)

22 Атласкин, А.А. Разделение газовых смесей в мембранном каскаде типа «Непрерывная мембранная колонна» : дис..... канд. техн. наук : 05.17.18 / А.А. Атласкин ; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Москва, 2020. – 186 с.

23 Амосова, О.Л. Гибридные мембранно-адсорбционные методы разделения многокомпонентных газовых смесей нефтехимии и биотехнологий, содержащих  $H_2$  (He) и  $CO_2$  : автореф. дис.... канд. хим.наук : 05.17.18 / О.Л. Амосова. – Москва : ИНХС РАН, 2011. – 27 с.

24 Лейтес, И.Л. Теория и практика химической энерготехнологии / И.Л. Лейтес, М.Х. Сосна, В.П. Семенов. – М. : Химия, 1988. – 280 с.

25 Ланг, М. Техническая концепция и практическая реализация проекта Амурского газоперерабатывающего завода / М. Ланг, Ф. Шмид, Х. Бауэр // Газовая промышленность. – 2019. – № 3 (781). – С. 66-72.

26 Хабибуллин, Р.Р. Повышение хладопроизводительности гелиевого блока III очереди гелиевого завода с целью увеличения выработки этановой фракции и широкой фракции легких углеводородов / Р.Р. Хабибуллин, Д.В.

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
|      |      |          |         |      |                       | 78   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       |      |

Пантелеев, А.М. Сыркин // Башкирский химический журнал. – 2012. – № 1. – С. 116-119.

27 Пат. 2708667 Российская Федерация, МПК C07C 7/00, Установка и способ извлечения этана из природного газа с применением каскадного охлаждения / ПУ Лимин [ и др.] ; ЧАЙНА ПЕТРОЛЕУМ ИНЖИНИРИНГ энд КОНСТРАКШН КОРП. – № 2018143421 ; Заявл. 08.01.2018 ; Оpubл. 11.12.2019, Бюл. № 35.

28 Пат. 77949 Российская Федерация, МПК F25J 3/00 Установка низкотемпературного разделения углеводородного газа / С.И. Иванов [и др.] ; Общество с ограниченной ответственностью "Газпром добыча Оренбург" – № 2008114026 ; Заявл. 09.04.2008 ; Оpubл. 10.11.2008.

29 Акрамов, Б.Ш. Модернизация процесса низкотемпературной сепарации газа / Б.Ш. Акрамов [и др.] // Наука, техника и образование. – 2020. – № 1 (65). – С.18-21

30 Паркин, А.Н. Перспективы повышения характеристик установок низкотемпературной переработки углеводородных газов путем применения высокоэффективных безмасляных турбодетандер-компрессорных агрегатов / А.Н. Паркин, И.И. Гальперин, А.В. Поликарпов // Материалы конференций. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2016. – С. 29-31.

31 Эдер, Л.В. Анализ современного состояния и прогноз развития мировой гелиевой промышленности с учетом перспектив по хранению гелия / Л.В. Эдер [и др.]. // Газовая промышленность. – 2020. – № 12 (810). – С. 68-76.

32 Зайцев, А.В. Криогеника в начале XXI века / А. В. Зайцев // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». – 2014. – № 1. – С. 6-15.

33 Мнушкин, И.А. Комплексная переработка природного гелийсодержащего углеводородного газа с повышенным содержанием азота / И.А. Мнушкин, Е.В. Ерохин, А.М. Сыркин // Башкирский журнал. – 2018. – Т. 25, № 2. – С. 81-85.

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 79   |

34 Хан, С.А. Оперативное подземное хранилище гелийсодержащего газа / С.А. Хан, А.С. Скрябин, Н.П. Бондаренко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2012. – № 1. – С. 72-77

35 Ларионов, А.В. Перспективы эффективного использования и сохранения ресурсов гелия в Восточной Сибири / А.В. Ларионов, Н.В. Павлов // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2017. – № 6. – С. 1057-1067.

36 Ларионов, А.В. Об эффективности инвестиционных проектов извлечения, реализации и хранения гелиевого ресурса на Чаяндинском нефтегазо-конденсатном месторождении / А.В. Ларионов, Н.В. Павлов, К.С. Попова // Известия ДВФУ. Экономика и управление. – 2017. – № 3. – С. 124-136.

37 Пат. 2667708 Российская Федерация, МПК В65G 5/00 Хранилище гелия / А. Ю. Климентьев, И. А. Климентьев. – № 2017130887 ; Заявл. 01.09.2017 ; Оpubл. 24.09.2018, Бюл. № 27.

38 СТО Газпром Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия. – введ. 2010-10-25. – М. : Управление метрологии и контроля качества газа и жидких углеводородов Департамента автоматизации систем управления технологически процессами ОАО «Газпром»; М. : ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2010. – 15 с.

39 Попов, О.М. Инфраструктура хранения и транспортировки гелия. Оборудование и технологии. – М. : ООО «НПО «Гелиймаш», 2018. – 16 с.

40 ГОСТ 5542-2014. Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. – введ. 2015-07-01. – М. : Федеральное агентство по техническому регулированию метрологии ; М. : Стандартиформ, 2019. – 12 с.

41 ТУ 0272-155-31323949-2014. Фракция этановая, поставляемая на экспорт. – введ. 2017-09-01. – М. : ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2017. – 21 с.

42 ТУ 38.101524-2015. Фракция широкая легких углеводородов. – введ. 2016-02-01. – М. : ОАО «ВНИИУС», 2016. – 47 с.

|      |      |          |         |      |                       |      |
|------|------|----------|---------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.19234.1.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                       | 80   |

43 Милованов, С.В. Разработка и внедрение инновационной технологии извлечения гелия из природного газа / С.В. Милованов, Н.Н. Кисленко, А.Д. Тройников // Научный журнал Российского газового общества. – 2016. – № 2. – С. 10-17.

44 Амосова, О.Л. Гибридные мембранноадсорбционные методы разделения многокомпонентных газовых смесей биотехнологии и нефтехимии, содержащих  $H_2$  и  $CO_2$ . / О.Л. Амосова, Р.В. Гринберг, В.В. Тепляков // Четвертая Международная конференция "Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-10". – 2010. – С. 239.

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

46 Теслюк, Л.М. Оценка эффективности инвестиционного проекта: учеб. пособие / Л.М. Теслюк, А.В. Румянцева. – Екатеринбург. : УрФУ, 2014. – 141 с.

47 ГОСТ 17.4.3.04-85. Охрана природы. Почвы. Общие требования к контролю и охране от загрязнений. – введ. 1985-12-17. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам ; М. : Министерство сельского хозяйства СССР, 1985. – 4 с.

48 Приказ Минздравсоцразвития России от 01.06.2009 № 290н «Об утверждении Межотраслевых правил обеспечения работников специальной одеждой, специальной обувью и другими средствами индивидуальной защиты» // Министерство здравоохранения и социального развития Российской Федерации. – 2009. – 39. – С. 16.

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

|      |      |          |         |      |                      |      |
|------|------|----------|---------|------|----------------------|------|
|      |      |          |         |      | ВКР.192341.180301.ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                      | 81   |

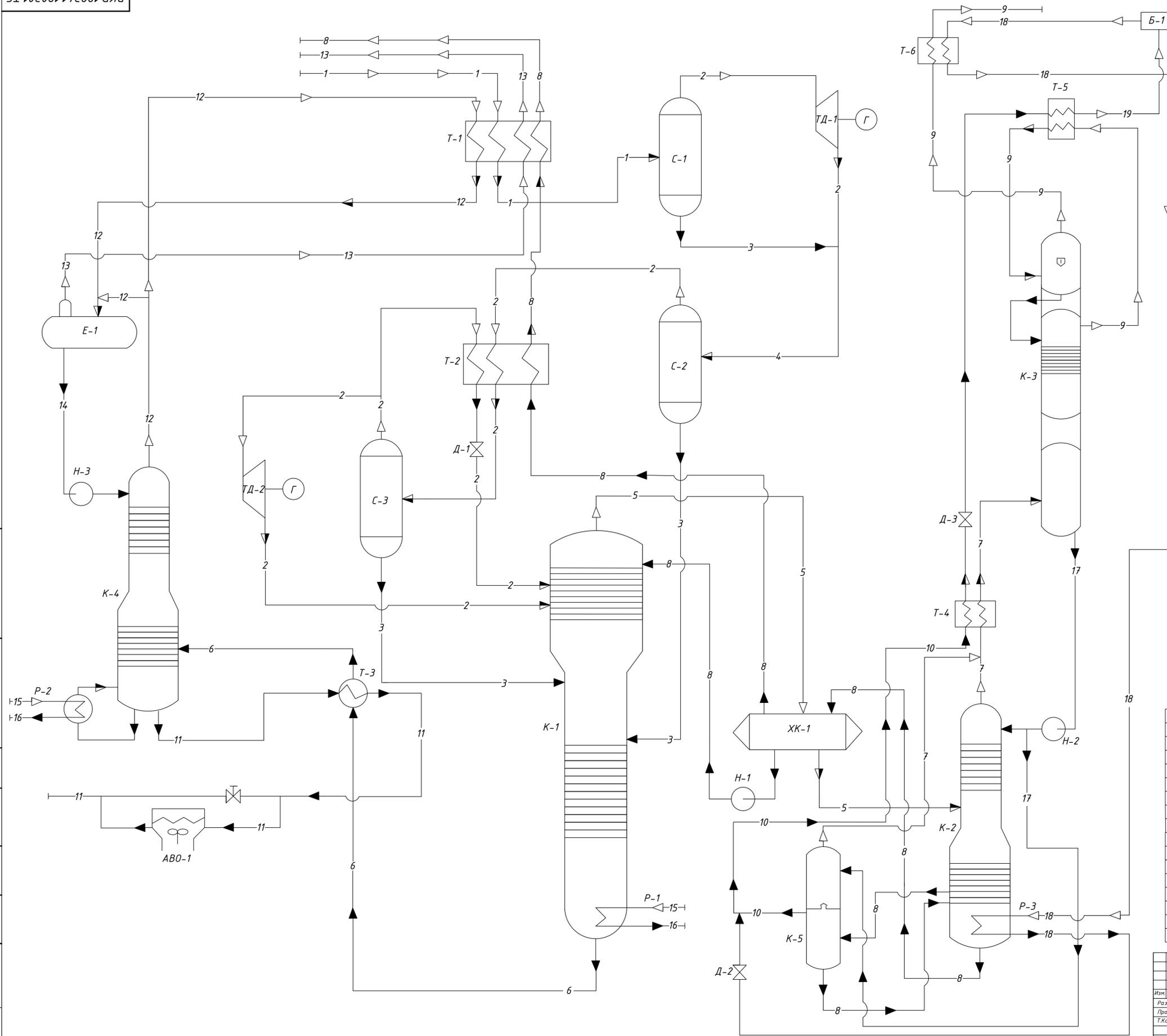
50 ГОСТ 26568-85. Вибрации. Методы и средства защиты. Классификация. – введ. 1987-01-01. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам ; М. : Издательство стандартов, 1985. – 17 с.

51 ГОСТ 30.001-83. Системы стандартов эргономики и технической эстетики. Основные положения. – введ. 1984-01-01. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам ; М. : Издательство стандартов, 1983. – 6 с.

|             |             |                 |                |             |                              |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|------------------------------|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>ВКР.19234.1.180301.ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |                              | 82          |

Справ. № Перв. примен.

Подп. и дата Инв. № дубл. Подп. и дата Инв. № подл.



| Обозначение Букв/Графическое | Наименование среды                                |
|------------------------------|---|
| -1-1-                        | Сырьевой газ                                      |
| -2-2-                        | Газ сепарации                                     |
| -3-3-                        | Углеводородный конденсат                          |
| -4-4-                        | Переохлажденный поток газа                        |
| -5-5-                        | Газ деметанизации                                 |
| -6-6-                        | Кубовый продукт деметанизатора (C <sub>2+</sub> ) |
| -7-7-                        | Азотно-гелиевая смесь                             |
| -8-8-                        | Метановая фракция                                 |
| -9-9-                        | Гелий-сырец                                       |
| -10-10-                      | Хладагент среднего давления                       |
| -11-11-                      | Широкая фракция легких углеводородов              |
| -12-12-                      | Газ деметанизации                                 |
| -13-13-                      | Этановая фракция                                  |
| -14-14-                      | Флегма на орошение деметанизатора                 |
| -15-15-                      | Водяной пар низкого давления                      |
| -16-16-                      | Водный конденсат                                  |
| -17-17-                      | Кубовый продукт (метан)                           |
| -18-18-                      | Хладагент высокого давления                       |
| -19-19-                      | Хладагент низкого давления                        |

| Обозначение | Наименование                                 | Кол-во |
|-------------|--|--------|
| T           | Теплообменники                               | 6      |
| C           | Сепаратор                                    | 3      |
| TD          | Турбодетандер                                | 2      |
| D           | Дроссель                                     | 3      |
| K-1         | Колонна деметанизации                        | 1      |
| K-2         | Колонна для извлечения азотно-гелиевой смеси | 1      |
| K-3         | Колонна для выделения гелия-сырца            | 1      |
| K-4         | Колонна деметанизации                        | 1      |
| K-5         | Колонна подпитки хладагента                  | 1      |
| P           | Ребойлер                                     | 3      |
| H           | Насос  | 3      |
| XK          | Холодильник-конденсатор                      | 1      |
| E           | Емкость                                      | 1      |
| ABO         | Аппарат воздушного охлаждения                | 1      |
| Г           | Генератор                                    | 2      |
| Б           | Блок теплового насоса                        | 1      |

**ВКР.19234.1.180301.ТС**

|          |               |          |       |      |   |   |       |          |
|----------|---------------|----------|-------|------|---|---|-------|----------|
| Изм.     | Лист          | № докум. | Подп. | Дата | Повышение энергоэффективности процесса криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов, азотно-гелиевой смеси из природного газа на Анжурском ГПЗ | Лит.  | Масса | Масштаб  |
| Разраб.  | Холодная Н.Е. |          |       |      |   | ч   |       | 1:1      |
| Провер.  | Гужель Ю.А.   |          |       |      |   | Лист 1  |       | Листов 1 |
| Т.Контр. |               |          |       |      |   |   |       |          |
| Н.Контр. | Родина Т.А.   |          |       |      |   | Техническая схема процесса криогенного выделения этана, широкой фракции легких углеводородов и азотно-гелиевой смеси из природного газа<br>АНГУ ИФФ<br>гр. 918-06 |       |          |
| Утвержд. | Гужель Ю.А.   |          |       |      | Формат А1   |   |       |          |