

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
“Национальный исследовательский университет ИТМО”

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ОЖИЖИТЕЛЯ ДЛЯ
ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ

Автор Артемьев Д. В.
(Фамилия, Имя, Отчество)

(Подпись)

Направление подготовки (специальность) 16.03.03
(код, наименование)

Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения

Квалификация Бакалавр
(бакалавр, магистр, инженер)*

Руководитель ВКР Зайцев А. В., доц., к.т.н
(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

Обучающийся Артемьев Давид Вячеславович
(ФИО полностью)
Группа W3405 Факультет/институт/кластер ФНТЭ

Направленность (профиль), специализация Криогенная техника и технологии

Консультант (ы):

а) _____
(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

б) _____
(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

ВКР принята “ ____ ” _____ 20 ____ г.

Оригинальность ВКР _____ %

ВКР выполнена с оценкой _____

Дата защиты “ ____ ” _____ 20 ____ г.

Секретарь ГЭК Василенок Анна Владимировна _____
(ФИО) (подпись)

Листов хранения _____

Демонстрационных материалов/Чертежей хранения _____

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО"

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ОП

Никитин А. А. _____
(Фамилия, И.О.) (подпись)

« ____ » « _____ » 20 ____ г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

Обучающийся Артемьев Давид Вячеславович

(ФИО полностью)

Группа W3405 Факультет/институт/кластер ФНТЭ

Квалификация Бакалавр

(магистр, инженер, бакалавр)**

Направление подготовки 16.03.03

(код, название направления подготовки)

Направленность (профиль) образовательной программы Холодильная, криогенная техника и технологии жизнеобеспечения

Специализация Криогенная техника и технологии

Тема ВКР Выбор оптимального режима оживителя природного газа

Руководитель Зайцев Андрей Викторович

(ФИО полностью, место работы, должность, ученая степень, ученое звание)

2 Срок сдачи студентом законченной работы до « 1 » « июня » 20 20 г.

3 Техническое задание и исходные данные к работе Оживитель природного газа
производительностью 1000 кг/час. Давления прямых и обратных потоков 3.5 и 0.6

МПА

4 Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов)

1. Обзор актуальности СПГ в мире 2. Исследование процесса сжижения природного газа на газораспределительных станциях 3. Криогенные циклы, применяющиеся при оживлении природного газа. 4. Термодинамический расчёт 5. Выводы.

5 Перечень графического материала (с указанием обязательного материала) _____ 1. Структурные
схемы циклов. 2. Графики зависимости показателей, характеризующих эффективность цикла от основных
технологических параметров _____

6 Исходные материалы и пособия

Климентьев А. Ю., Митрова Т.А., Собко А. А. (ред.) Возможности
и перспективы развития малотоннажного СПГ в России. М.: Московская
школа управления Сколково, 2018. — 187 с

Краковский Б. Д. и др. Современные технологии сжижения природного газа в установках малой и средней про-
изводительности //Использование сжиженного природного газа на железнодорожном транспорте. Материалы засе-
дания секции Научно-технического совета ОАО «Газпром». - М: ООО ИРЦ Газпром. - 2010. - С.70 - 79.

Федорова Е. Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии
и оборудование. М.: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2011. — 159 с.

7 Дата выдачи задания « 9 » « декабря » 2019 г.

Руководитель ВКР _____
(подпись)

Задание принял к исполнению _____ « » « » 20 г.
(подпись)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО"

АННОТАЦИЯ

ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Обучающийся _____ Артемьев Д. В. _____
(ФИО)

Наименование темы ВКР: _____ Выбор оптимального режима ожижителя природного газа

Наименование организации, где выполнена ВКР _____ Университет ИТМО _____

ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1 Цель исследования _____ Определение критерия оптимальности для ожижителя природного газа _____

2 Задачи, решаемые в ВКР _____ Подбор соответствующих режимных параметров, характерных для оптимального режима работы ожижителя природного газа _____

3 Число источников, использованных при составлении обзора _3_ _____

4 Полное число источников, использованных в работе _____ 18 _____

5 В том числе источников по годам

Отечественных			Иностраннх		
Последние 5 лет	От 5 до 10 лет	Более 10 лет	Последние 5 лет	От 5 до 10 лет	Более 10 лет
2	2	3			

6 Использование информационных ресурсов Internet _____ Да, 6 _____
(Да, нет, число ссылок в списке литературы)

7 Использование современных пакетов компьютерных программ и технологий (Указать, какие именно, и в каком разделе работы)

Пакеты компьютерных программ и технологий	Раздел работы
Excel	4.1

8 Краткая характеристика полученных результатов _____ Установлено, что производство СПГ на ГРС является важной частью развития малотоннажного производства СПГ на ГРС. Для повышения эффективности работы ожижителя природного газа было предложено увеличение коэффициента ожижения с помощью определения соответствующих оптимальных режимных параметров _____

9 Полученные гранты, при выполнении работы _____
(Название гранта)

10 Наличие публикаций и выступлений на конференциях по теме выпускной работы _____ нет _____
(Да, нет)

а) 1 _____
(Библиографическое описание публикаций)

2 _____

3 _____

б) 1 Конгресс молодых учёных

(Библиографическое описание выступлений на конференциях)

2 _____

3 _____

Обучающийся Артемьев Д. В. _____
(ФИО) (подпись)

Руководитель ВКР Зайцев А. В. _____
(ФИО) (подпись)

“08” июня 2020 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	10
ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	12
1 ПОЛОЖЕНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА СПГ В МИРОВОМ СЕГМЕНТЕ	
1.1 Производство СПГ в мире.....	13
1.2 Производство СПГ в России.....	15
2. СТРУКТУРА ПРОИЗВОДСТВА СПГ	
2.1 Основные процессы, происходящие на ГРС.....	17
2.2 Технологическая схема ГРС.....	19
2.3 Типы ГРС.....	21
2.4 Производство СПГ на газораспределительной станции.....	25
3 ОСНОВНЫЕ КРИОГЕННЫЕ ЦИКЛЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕСЯ ПРИ ОЖИЖЕНИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА	
3.1 Установка с простейшим дроссельным циклом.....	28
3.2 Установка с простейшим дроссельным циклом с предварительным охлаждением.....	30
3.3 Установка с дроссельной ступенью и вихревой трубой.....	32
3.4 Установка высокого давления с детандером.....	33
3.5 Детандерный цикл на основе цикла Клода.....	34
4 ОЖИЖИТЕЛИ ПРИРОДНОГО ГАЗА И МИНИ-ЗАВОДЫ СПГ	
4.1 Модернизированный ожижитель ПГ на базе АГНКС.....	37
4.2 Ожижительные установки на ГРС.....	37
4.2.1 Ожижитель ПГ на ГРС с вихревой трубой.....	38
4.2.2 Ожижитель ПГ типа УСНП 00.000.....	39
4.2.3 Ожижитель ПГ на базе АГНКС – ГРС.....	40
5 ПРОВЕДЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЁТА	
5.1 Термодинамический расчёт процесса сжижения ПГ на ГРС.....	42

5.2 Выводы.....	48
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	49
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	50

ВВЕДЕНИЕ

Сжиженный природный газ (СПГ) – это искусственно сжиженный путём охлаждения до температуры -160°C газ, предназначенный для транспортировки с целью импорта или экспорта с последующей реализацией в газообразное состояние, а также для транспортировки.

СПГ обладает следующими свойствами:

- не имеет запаха
- бесцветный
- не вызывает коррозии
- не горюч и не токсичен
- в жидкой форме теряет способность взрываться и воспламеняться, однако при испарении природный газ может воспламениться в случае контакта с источником горения, и, если концентрация испарений в воздухе будет составлять от 5 до 15 %.

Преимущества СПГ:

1. Самым главным и явным преимуществом является возможность транспортировать на дальние расстояния и хранить природный газ в жидком виде.
2. СПГ позволяет газифицировать объекты, удаленные от магистральных трубопроводов на большие расстояния, путем создания резерва СПГ непосредственно у потребителя, избегая строительства дорогостоящих трубопроводных систем.
3. СПГ является намного более экологичным в сравнении с нефтью и углем, так как горит чисто и почти не производит побочных продуктов, за исключением воды и углекислого газа. Однако в случае сравнения экологичности транспортировки газа в сжиженном виде и в трубном виде, выигрывает последний. Углеродный след от трубопроводного газа в 2-4 раза меньше.
4. Относительная дешевизна по сравнению с бензином, как вид топлива.

Недостатки СПГ:

1. Самым главным недостатком является ограниченное количество залежей природного газа. Это и является главной причиной, почему СПГ не может стать альтернативой нефти. При действующих энергетических потребностях, залежей ПГ хватит лишь на 40-90 лет использования.

2. Относительно дорого преобразовать автомобили с бензиновым двигателем в автомобили, работающие на ПГ, что и является причиной того, почему автомобили, работающие на СПГ, не стали так широко распространены. Кроме того, количество станций для заправки ПГ малое, и невозможно путешествовать на большие расстояния.

3. Невозможность оперативной покупки СПГ на рынке в период пикового спроса на газ, ввиду физической невозможности доставки СПГ за один день. В данном случае СПГ проигрывает обычному трубопроводному газу, так как последний может быть оперативно поставлен потребителю из запасов, создаваемых в подземных хранилищах

4. Ранее уже сообщалось о том, что СПГ не горит и не воспламеняется, однако опасности с СПГ все же связаны во время его транспортировки. Дело в том, что при взаимодействии с водой СПГ приводит к взрывам, что и создает угрозу крушений для корабля во время транспортировки, особенно во время шторма.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является выбор оптимального режима работы ожижителя ПГ для ГРС. Необходимо определить наиболее предпочтительные режимные параметры (давление, температура) для выбранного критерия оптимальности. В качестве этого критерия выбирается коэффициент ожижения.

Как видно из рисунка 1, СПГ имеет огромную актуальность применения во многих областях, что и доказывает его значимость, как топливо будущего.



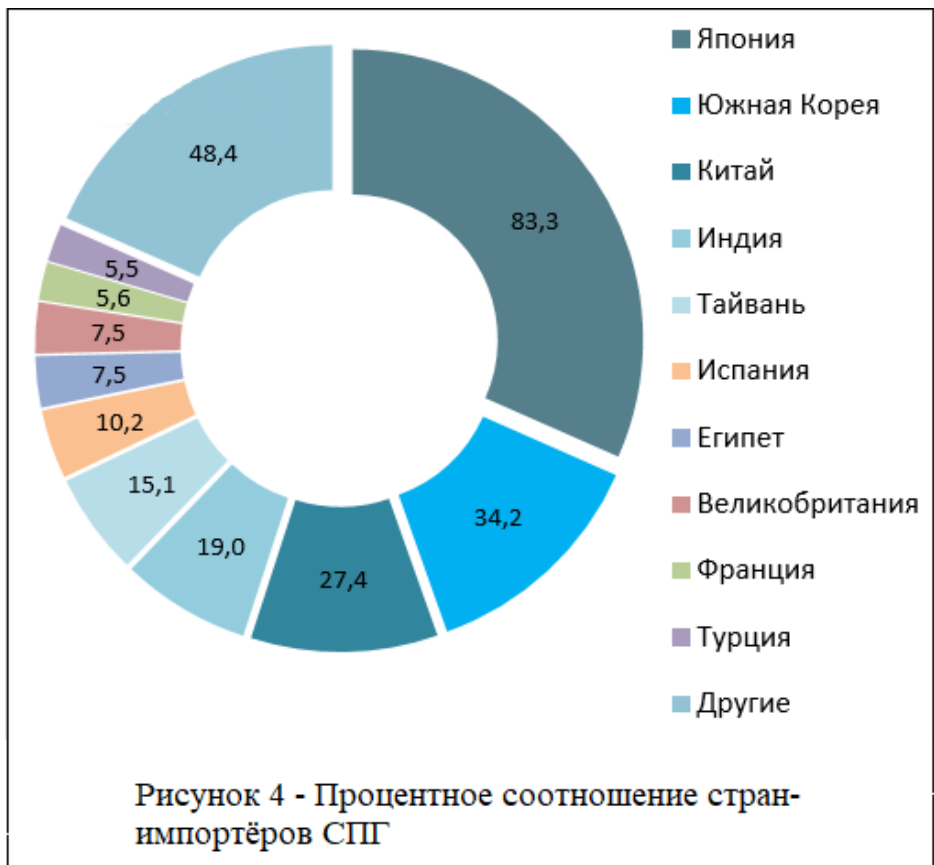
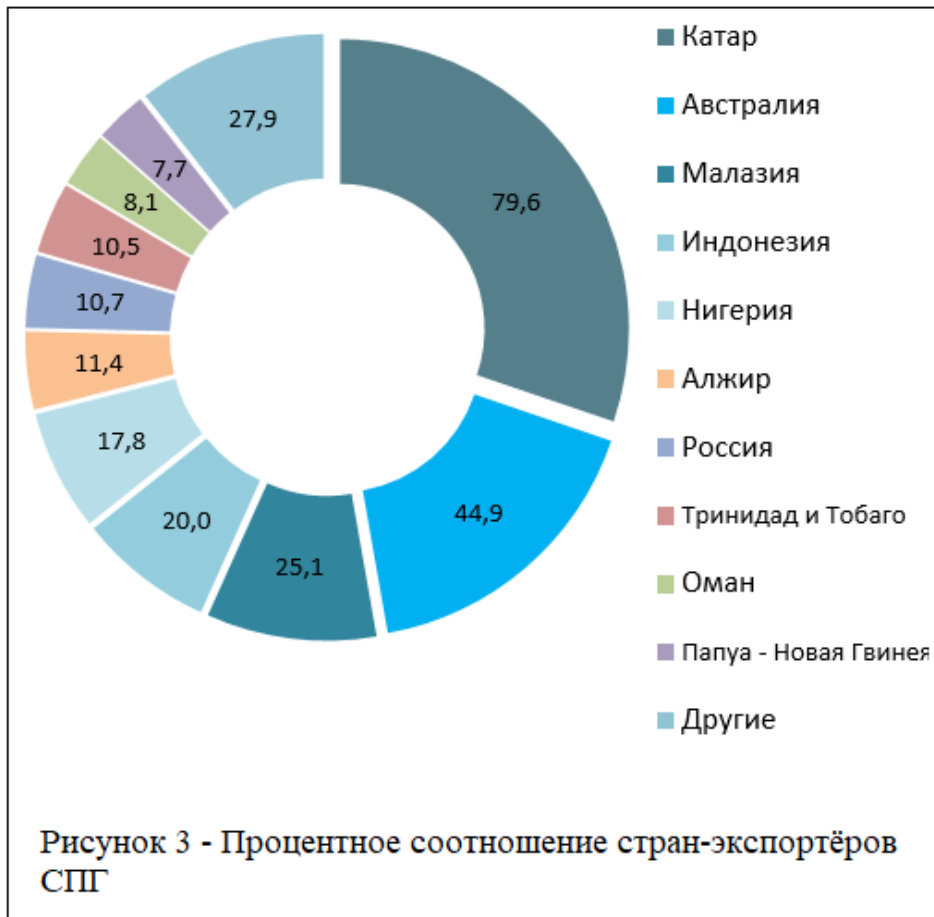
1 ПОЛОЖЕНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА СПГ В МИРОВОМ СЕГМЕНТЕ

1.1 Производство СПГ в мире

На рисунке 2 изображена карта стран экспортёров и импортёров СПГ во всем мире.



Более подробное распределение стран-экспортёров СПГ и стран-импортёров СПГ в процентном соотношении можно увидеть на рисунках 3 и 4. Из этих рисунков видно, что наибольшим экспортёром СПГ на данный момент является Катар, а наибольшим импортёром – Япония. Доля России в данных обзорах составляет 10,7%, что наталкивает на мысль о том, что производство СПГ в России находится еще на развивающемся этапе.



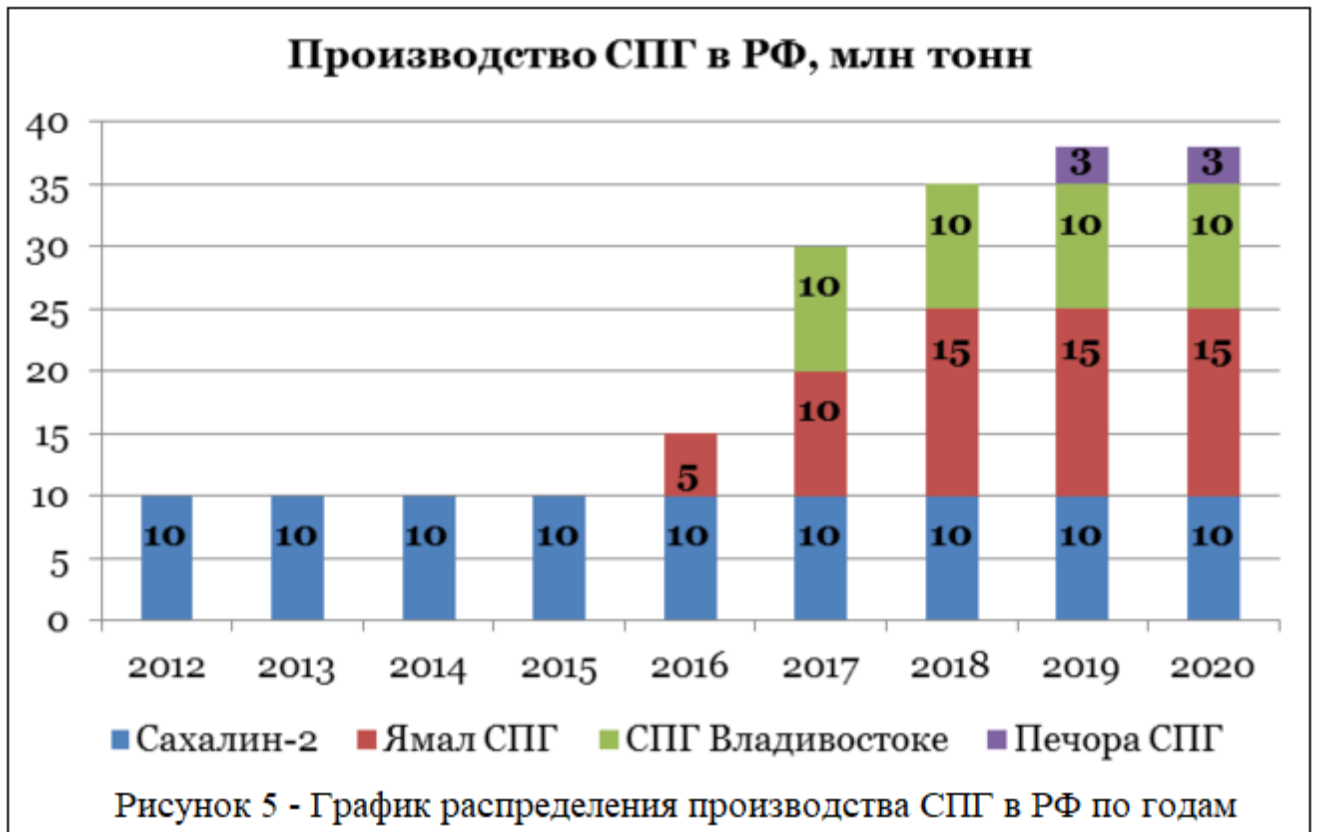
1.2 Производство СПГ в России

В настоящее время производство СПГ в России является одним из важных направлений российской экономики, наряду с добычей нефти в силу того, что экономика РФ в основном является сырьевой. Российская доля добычи СПГ в мировой экономике составляет 6%, и будет достигать 15% к 2025 году согласно расчётам Министерства Энергетики РФ. На рисунке 5 изображены все крупнейшие СПГ проекты в России, в том числе и готовившиеся к запуску. На конец 2019 года суммарная мощность всех СПГ-проектов в РФ составляла 28.5 млн тонн, и в случае успеха всех будущих проектов в срок, производство достигнет 80 млн тонн в год, в результате чего российские производители займут 15-20% от всего рынка.

Таблица 1 - Крупнейшие СПГ-проекты в России

Проект	Год запуска	Мощность (млн тонн)
Сахалин 2	2009	10.2
Ямал СПГ	2018	16.5
Криогаз - Высоцк	2019	0.66
Владивосток-СПГ	2020	10.0
Арктик-СПГ 2	2022	18.0
Балтийский СПГ	2023	11.5
Дальневосточный СПГ	2024	13.0

Обращая внимание на рисунок 6, можно сделать вывод, что производство СПГ стремительно выросло за последнее десятилетие. Наиболее выделяется здесь проект Ямал СПГ, как самый высокопроизводительный. Криогаз - Высоцк же пока что является одним из самых молодых проектов, и обладает самой низкой производительностью.



2 ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА СПГ НА ГРС

2.1 Основные процессы, происходящие на ГРС

Газораспределительная станция (ГРС) – станция, предназначенная для понижения давления газа из газопровода до необходимого по условиям безопасности уровня.

В ходе работы на ГРС происходят следующие процессы:

1. Очистка газа от твердых и жидких примесей, в том числе удаление пыли и влаги. Так как транспортируемый по магистральным газопроводам газ переносит с собой нежелательные примеси, такие как: песок, окалина, вода, конденсат и масло, то во избежание преждевременного износа газопровода, необходимо проводить тщательную очистку газа.

2. Редуцирование газа, заключающееся в снижении давления на входе в ГРС до заданного значения и поддержания его с заданной точностью. Делается это по причине того, что не каждое давление подходит для бытового применения.

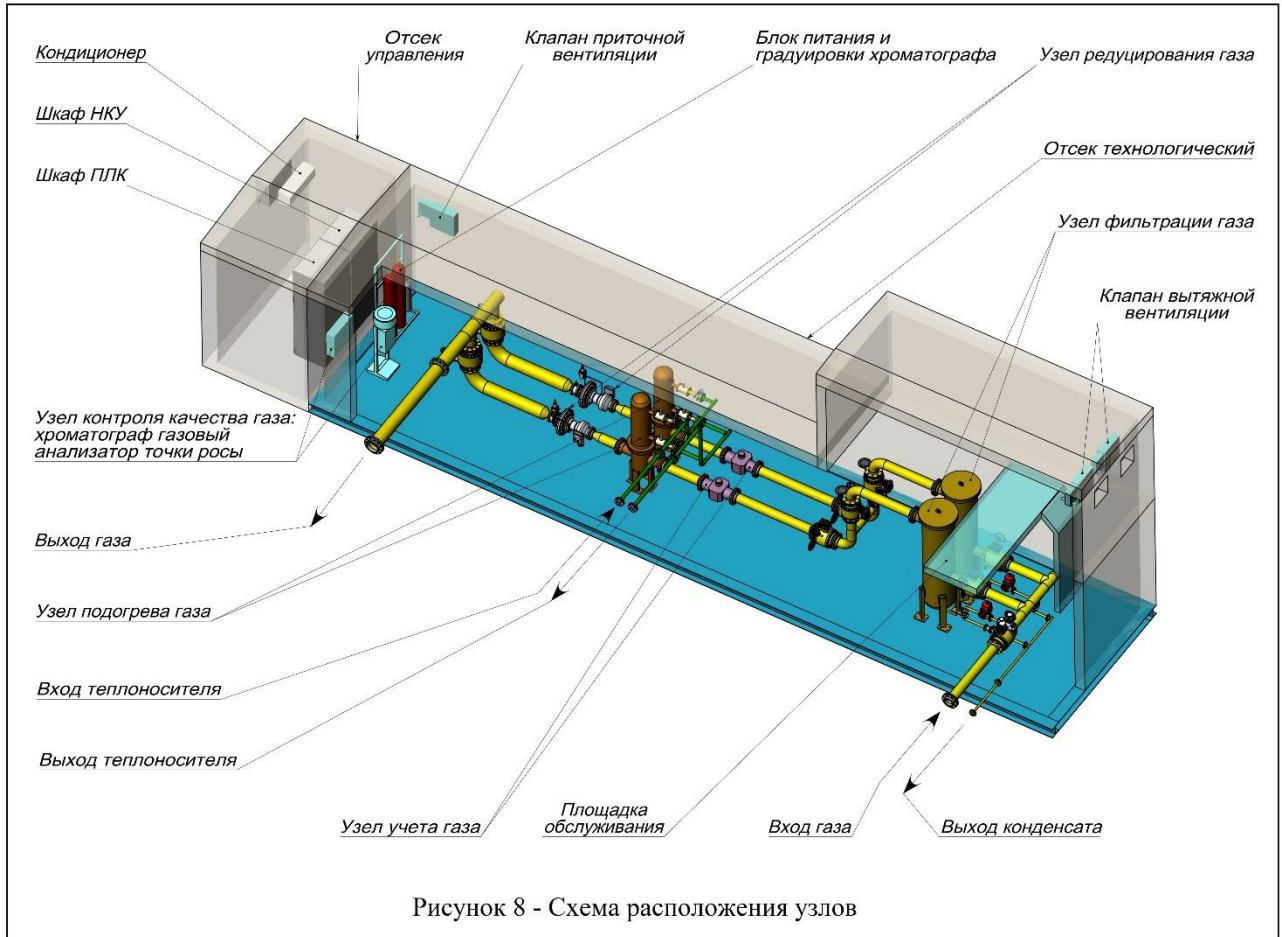
3. Одоризация газа, суть которой в придании голубому топливу специфического запаха с помощью специальных компонентов (одорантов). Делается с целью обнаружения своевременных утечек

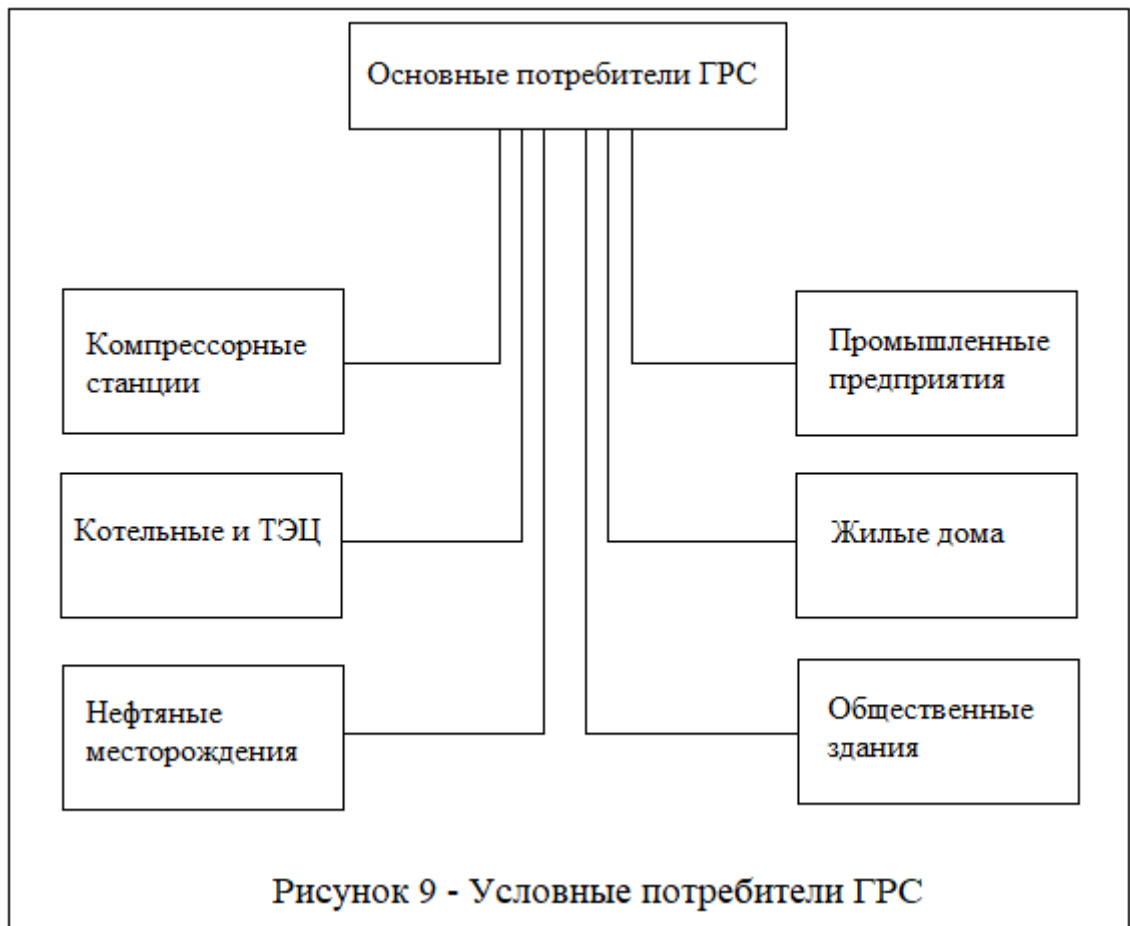


Из схемы видно, что реагент вводится в газопровод при помощи специальной установки. Она обеспечивает подачу одоранта, количество которого пропорционально расходу газа.

4. Учет расхода газа перед подачей его для потребителя. На рисунке 9 представлены потребители СПГ, которые находятся в достаточном количестве.

Схема с основными узлами, в которых происходят процессы на СПГ наглядно показана на рисунке 8.

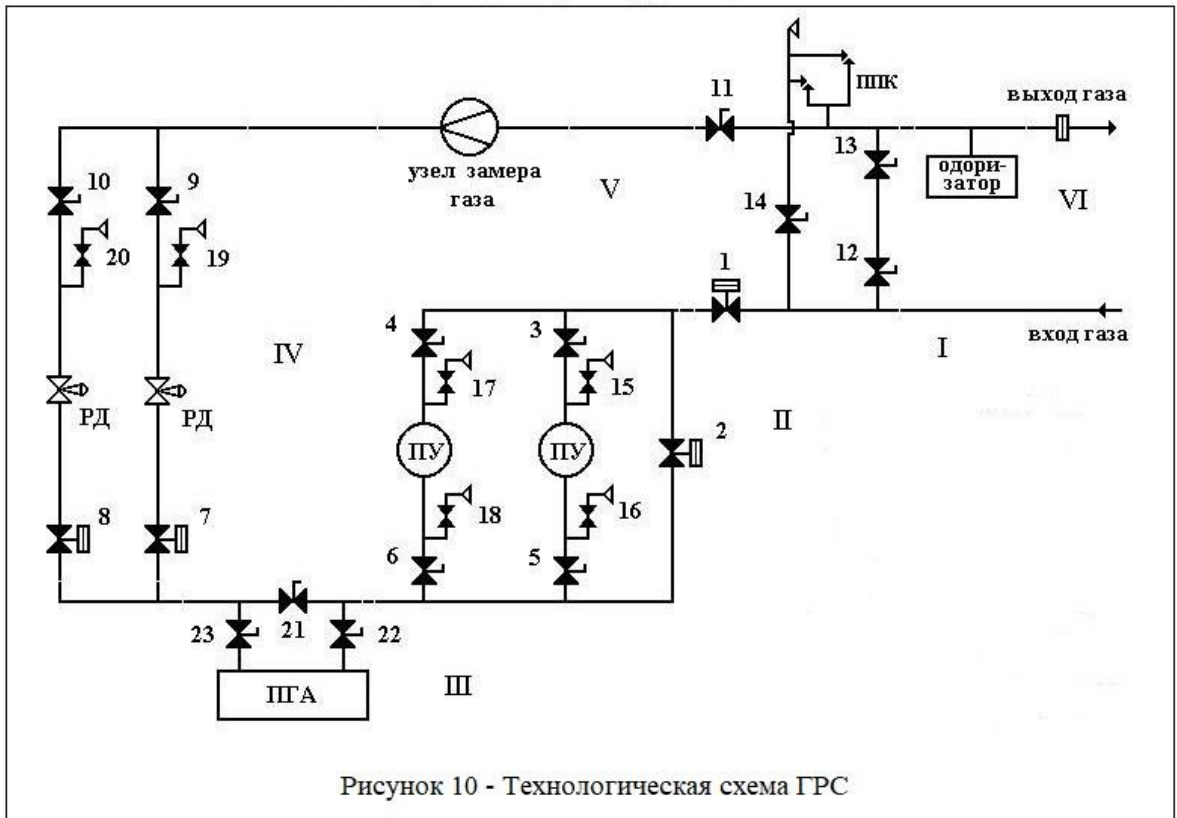




2.2 Технологическая схема ГРС

Основные узлы ГРС:

1. Узел переключения
2. Узел очистки газа
3. Узел предотвращения гидратообразования
4. Узел редуцирования
5. Узел учёта газа
6. Узел одоризации газа



Узел переключения ГРС нужен для переключения потока газа высокого давления с автоматического на ручное регулирование давления газа по обводной линии.

Узел очистки газа на ГРС предназначен для предотвращения попадания механических примесей и жидкостей в технологические трубопроводы, оборудование, средства контроля и автоматики станции и потребителей. Для очистки газа на ГРС должны применяться пылеуловители, обеспечивающие подготовку газа для стабильной работы оборудования ГРС. Эксплуатация узла очистки должна проводиться в соответствии с требованиями действующих нормативных документов.

Узел предотвращения гидратообразований предназначен для предотвращения обмерзания арматуры и образования кристаллогидратов в газопроводных коммуникациях и арматуре.

Узел редуцирования задействуется для снижения и автоматического поддержания заданного давления газа, подаваемого потребителям.

Узел учёта газа

Данный узел предназначен для коммерческого учёта газа.

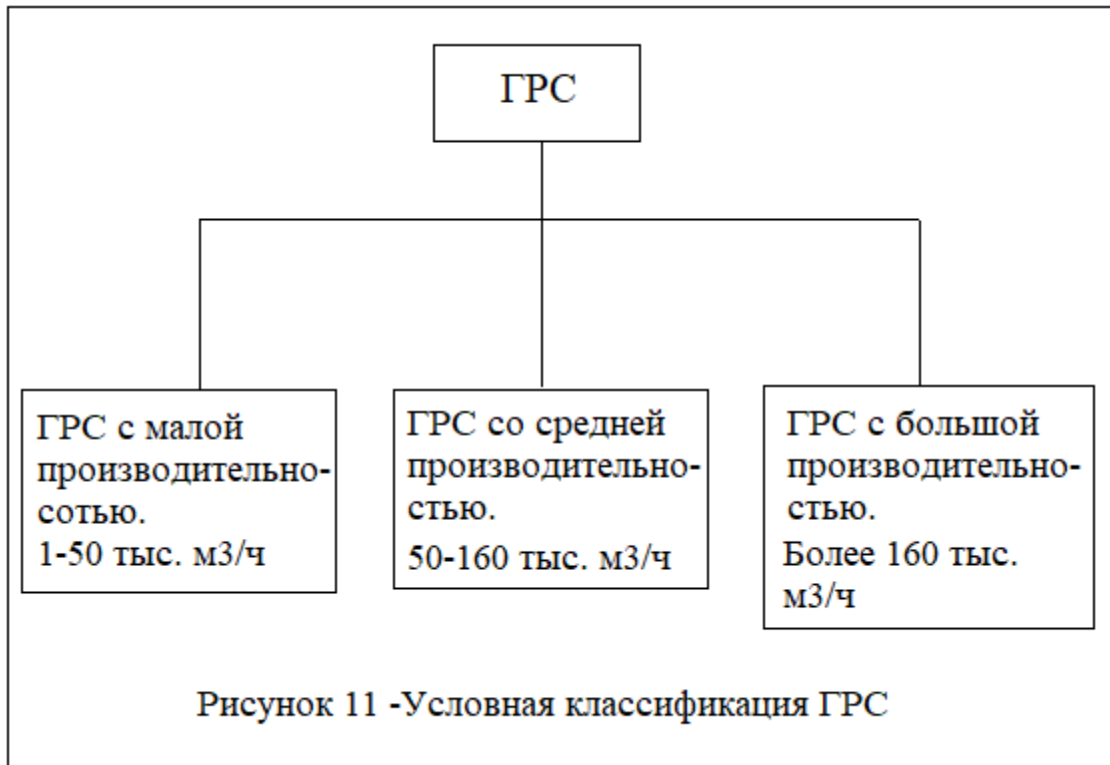
Узел одоризации газа служит для придания голубому топливу специфического запаха с помощью специальных компонентов (одорантов) во избежание утечек.

2.3 Типы ГРС

Состав каждой ГРС одинаков. К основным частям конструкции ГРС относятся:

- Блок очистки газа
- Блок гидратообразования
- Блок одоризации
- Блок редуцирования
- Отключающие устройства

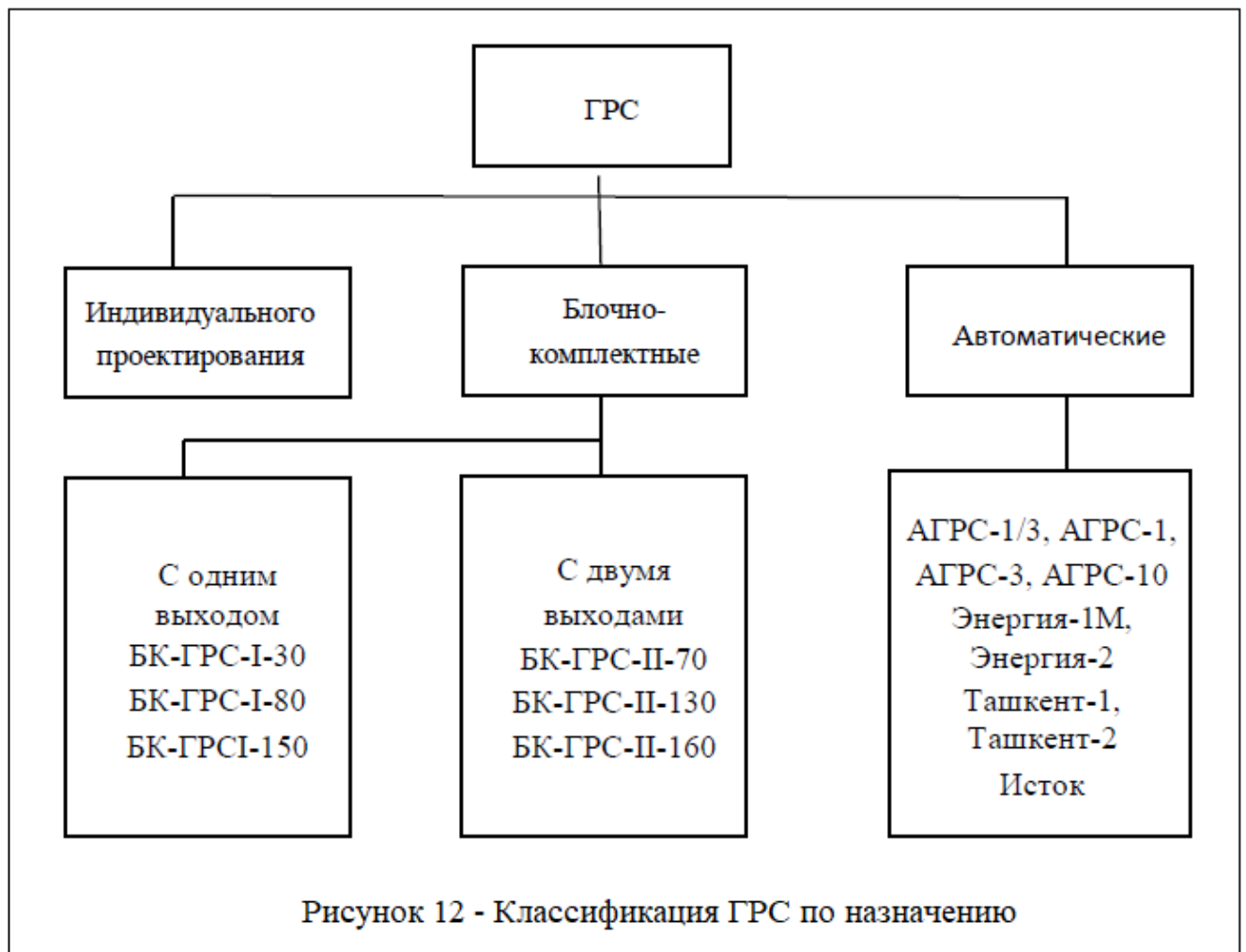
Газораспределительные станции классифицируются по нескольким признакам:



К станциям малой производительности (1-50 тыс. м³/ч) относятся ГРС следующего типа: "Энергия-1", "Энергия-3", "Ташкент-1" и "Ташкент-2"

К станциям средней производительности (50-160 тыс. м³/ч) относятся блочно-комплектные ГРС. Данные станции, как и соответствует названию, сделаны в блочно-комплектном виде, с одной или двумя выходными линиями к потребителям. Часть технологического оборудования здесь размещена в блок-боксах, в которых расположено регуляторное управление, и система отопления боксов, а другая часть размещена на открытой площадке. Из этого типа станции можно выделить следующие виды: "БК-ГРС-1-30", "БК-ГРС-Н-70", "БК-ГРС-1-150".

К станциям большой производительности (более 160 тыс. м³/ч) относятся станции, выполненные по индивидуальным проектам. Чаще всего, это ГРС и контрольно-распределительные пункты (КРП), подающие или распределяющие газ в крупные промышленные объекты, либо жилые здания.



Станции индивидуального проектирования – это станции ГРС, располагающиеся вблизи населённых пунктов и в общественных зданиях. Преимущество такой станции - улучшение условий обслуживания технологического оборудования и бытовых условий для обслуживающего персонала.

Блочно - комплектные ГРС (БК-ГРС) выполнены для снабжения газом городов, населённых пунктов и промышленных предприятий с задействованием магистральных газопроводов с давлением газа 12-55 кгс/см² и поддержания выходного давления 3, 6, 12 кгс/см².

БК-ГРС классифицируются на ГРС с одной или двумя выходными линиями к потребителю. Существуют БК-ГРС шести типоразмеров. Три типоразмера с одним выходом на потребителя: БК-ГРС-I-30, БК-ГРС-I-80, БК-ГРС-I-150. И три типоразмера с двумя выходами на потребителя: БК-ГРС-II-70, БК-ГРС-II-130 и БК-ГРС-II-160

Автоматические ГРС

Данный тип ГРС содержит по большей части те же конструктивные узлы, что и БК-ГРС и ГРС индивидуального проектирования.

Автоматические ГРС предназначены для снижения высокого давления (55 кгс/см²) природного, попутного нефтяного, искусственного газов, не содержащих агрессивных примесей, до заданного низкого давления (3-12 кгс/см²), поддержания его с заданной точностью $\pm 10\%$, а также для подготовки газа перед подачей потребителю в соответствии с требованием ГОСТ 5542-2014.



Рисунок 13 - Схема БК-ГРС с одним потребителем



Рисунок 14 - Схема БК-ГРС с двумя потребителями

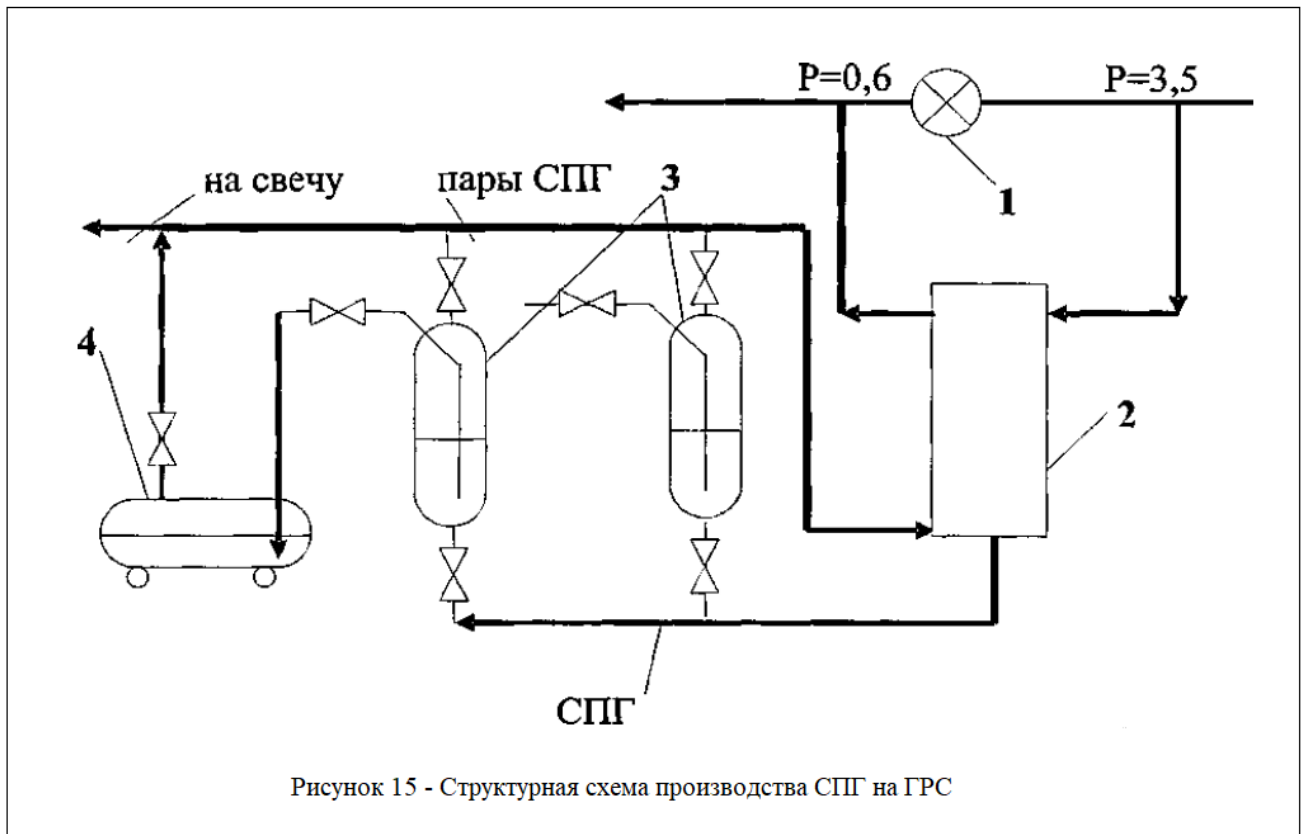
2.4 Производство СПГ на газораспределительной станции.

Использование СПГ на ГРС является достаточно целесообразным в силу того, что не нужно использовать компрессоры и затрачивать энергию для их привода, что позволяет задействовать давление газа в трубопроводе для реализации технологического цикла.

Производство СПГ на ГРС основывается на том, что газ сжижается за счет использования в детандере перепада давлений между магистральным и распределительным газопроводом. Данный метод существенно сокращает энергетические затраты и является весьма экономичным. Суть метода состоит в том, что на ГРС производится ПГ, который затем автотранспортом в криогенных цистернах отправляется к потребителю и переливается в криогенные резервуары. После чего заправляется в жидком состоянии в криогенные бортовые системы или регазифицируется и поступает в котельные в качестве топлива.

На рисунке 15 изображена схема комплекса производства СПГ на ГРС, на которой:

- 1 - редуцирующее устройство на ГРС;
- 2 - установка получения СПГ;
- 3 - резервуары сбора и хранения СПГ на ГРС;
- 4 - автоцистерна.



Полная структура обеспечения потребителей ПГ с использованием технологий СПГ представлена на рисунке 16.

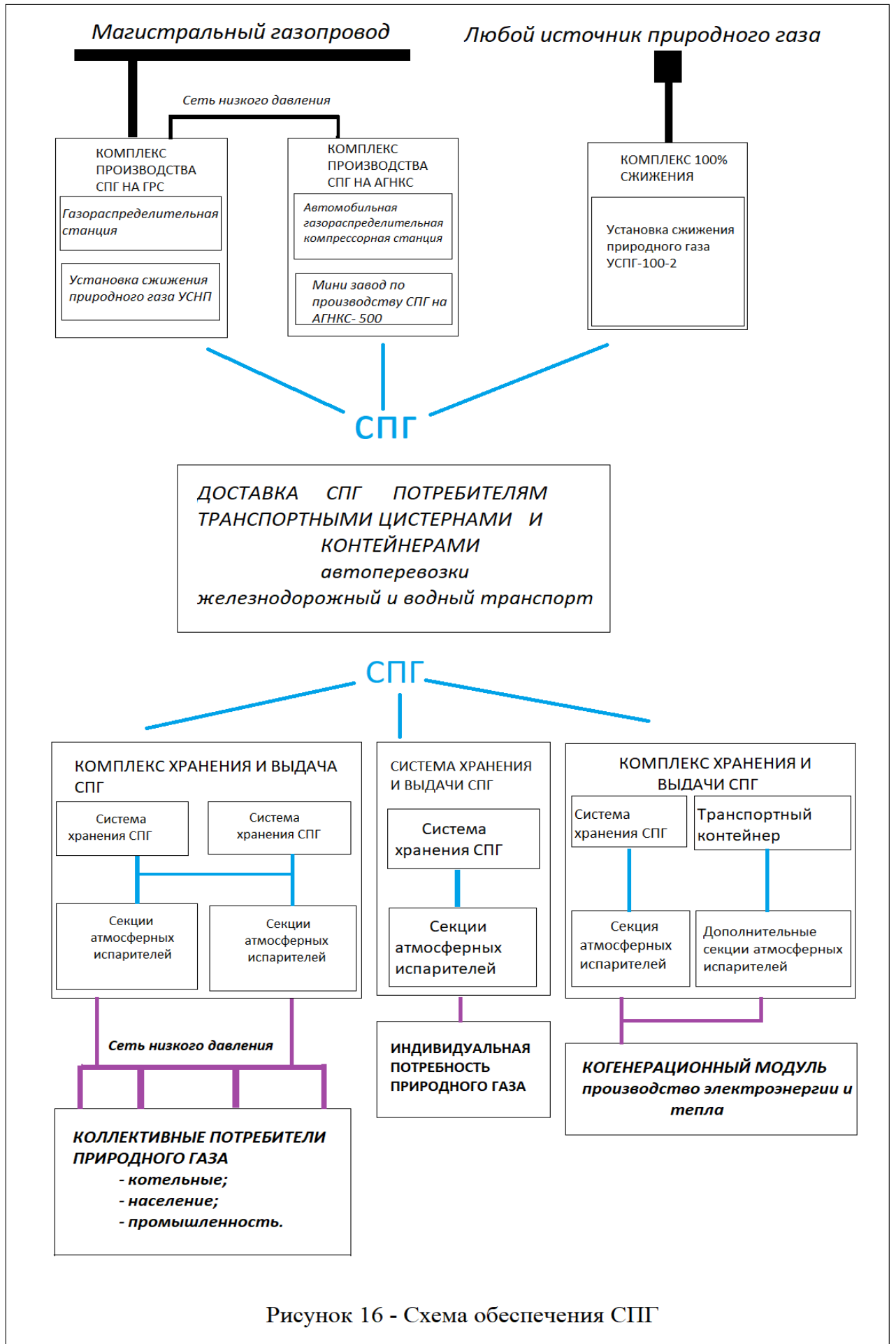


Рисунок 16 - Схема обеспечения СПГ

3 ОСНОВНЫЕ КРИОГЕННЫЕ ЦИКЛЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕСЯ ПРИ ОЖИЖЕНИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

«В соответствии с работой [35] в настоящее время для ожижения ПГ используются следующие криогенные циклы:

- дроссельные циклы;
- детандерные циклы среднего давления;
- каскадные криогенные циклы с чистыми хладагентами;
- однопоточные каскадные циклы с хладагентом, являющимся многокомпонентной смесью (смешанный хладагент – СХА);
- комбинация вышеперечисленных циклов. (Акулов Л. А. Установки и системы низкотемпературной техники. Ожижение природного газа и утилизация холода сжиженного природного газа. Учеб. Пособие.- СПб: СПбГУНиПТ. 2006 г.)»

В качестве основы выбора схемы ожижителя являются:

- параметры ожижающегося природного газа. Например: давление, температура.
- производительность ожижителя

Рассмотренные в дальнейшем циклы являются наиболее предпочтительными для применения их в ожижителях на ГРС в силу их простоты и то же время достаточной эффективности.

3.1 Установка с простейшим дроссельным циклом

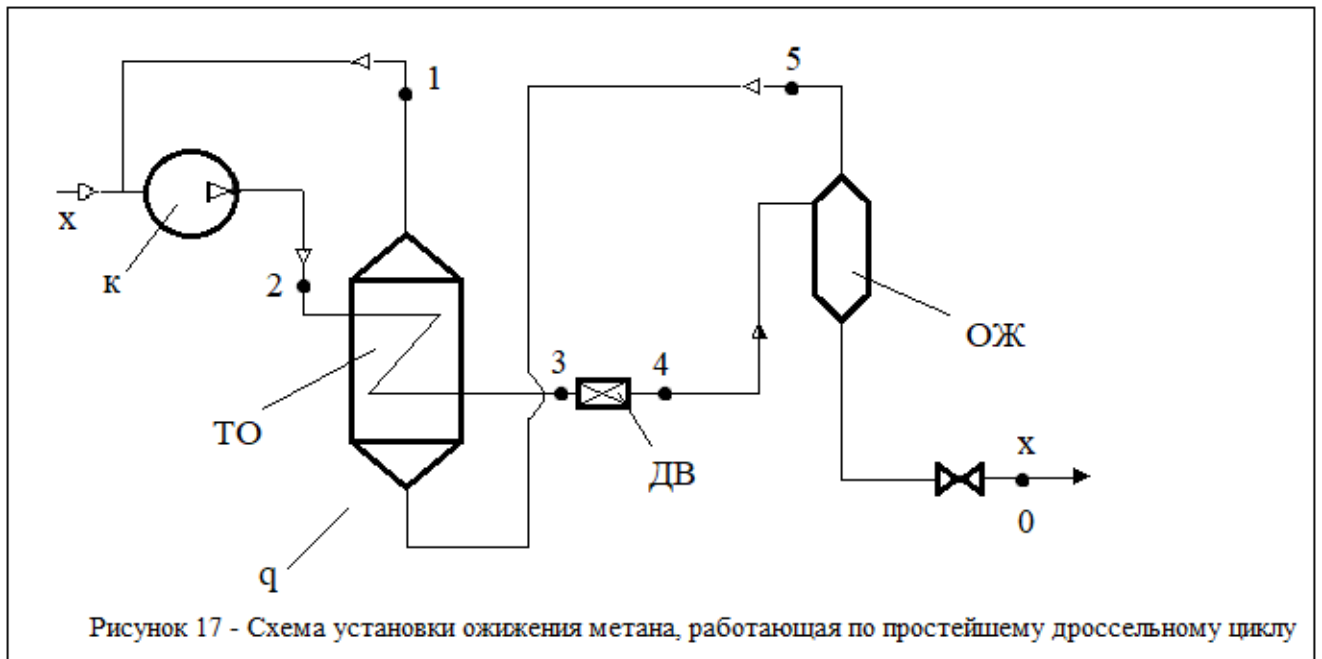
Среди криогенных циклов, использующихся для ожижения природного газа, наиболее простейшим является дроссельный цикл с газообразным метаном в виде рабочего вещества.

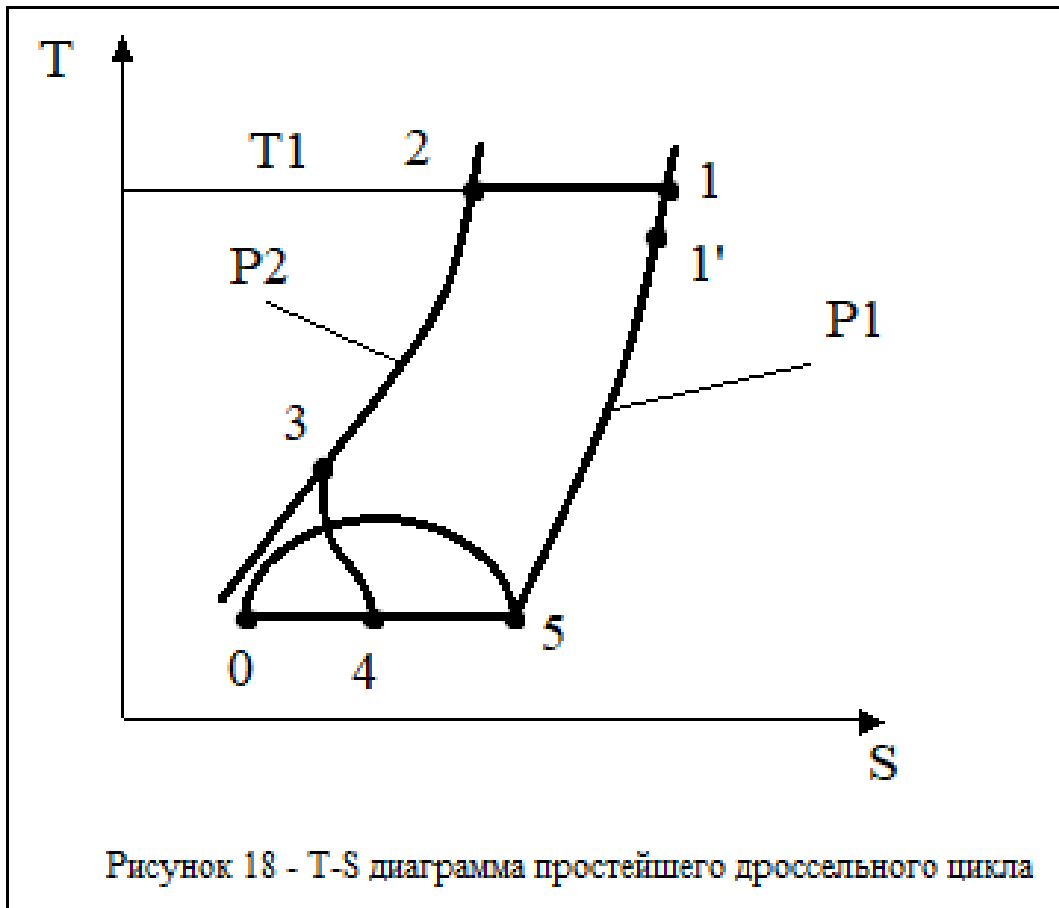
Цикл начинается с попадания сжатого в компрессоре метана в криогенный блок. В дальнейшем поток газа проходит через теплообменник ТО, в результате

чего и охлаждается. Далее газ поступает на дроссельный вентиль, где дросселируется, в результате чего давление газа опускается до значения P_1 , а температура до T_0 . Результатом данной последовательности действий является сконденсированный метан. Образующаяся после дросселя парожидкостная смесь проходит в дальнейшем в отделитель жидкости ОЖ, где уже газ в жидком состоянии выводится из установки.

Практические результаты показывают, что обычно удается получить по крайней мере 20% жидкого метана от того количества метана, что в исходном состоянии.

Схема и сам цикл представлены на рисунках 17 и 18.





3.2 Установка с простейшим дроссельным циклом с предварительным охлаждением

Эффективность простейшего дроссельного цикла может быть значительно повышена при помощи добавления в схему цикла ступени с предварительным охлаждением. Чаще всего в качестве источника внешнего охлаждения выступает холодильная машина.

Данный цикл начинается со сжатия метана в компрессоре от давления $P1$ до давления $P2$. После чего уже сжатый газ поступает при температуре $T1$ поступает в теплообменник $TO1$, где охлаждается. Охладившись, газ попадает в теплообменник $TO2$, роль которого играет испаритель холодильной машины, где и охлаждается до температуры $T4$. В теплообменнике $T3$ происходит последнее охлаждение потока сжатого метана, после чего газ при температуре $T5$ выходит на дроссельный

вентиль, где дросселируется, и теряет давление до P_1 . Парожидкостная смесь, получившаяся в результате дросселирования, направляется в отделитель жидкости, где жидкая часть сливается, а сухая идёт по обратному потоку, используя для охлаждения последующей порции сжатого метана.

На рисунках 19 и 20 представлены схема установки и сам цикл.

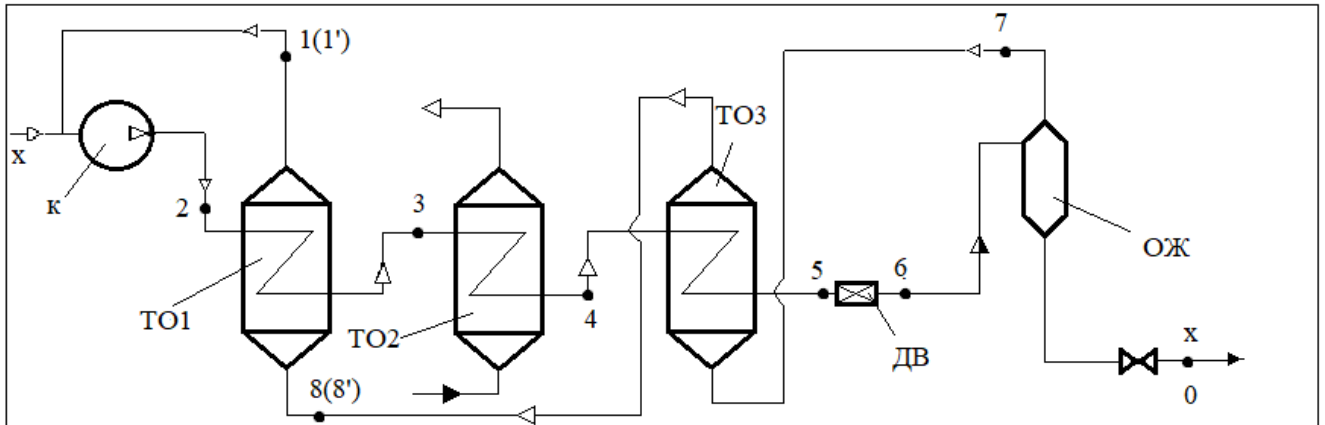


Рисунок 19 - Схема установки ожижения метана, работающая по простейшему дроссельному циклу с предварительным охлаждением

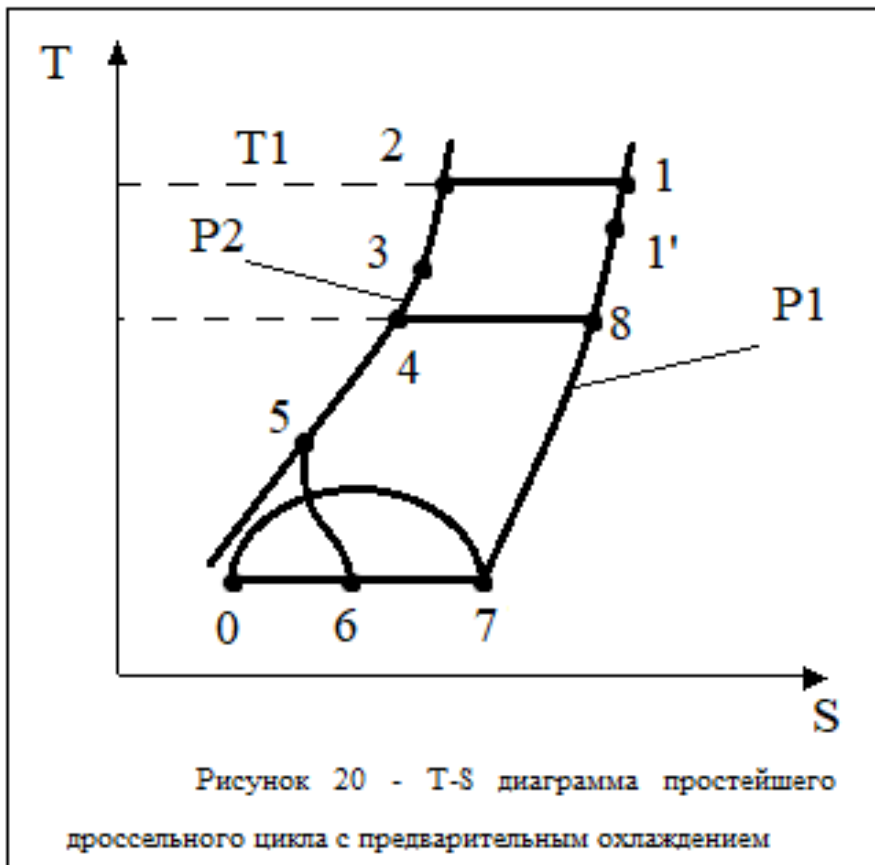


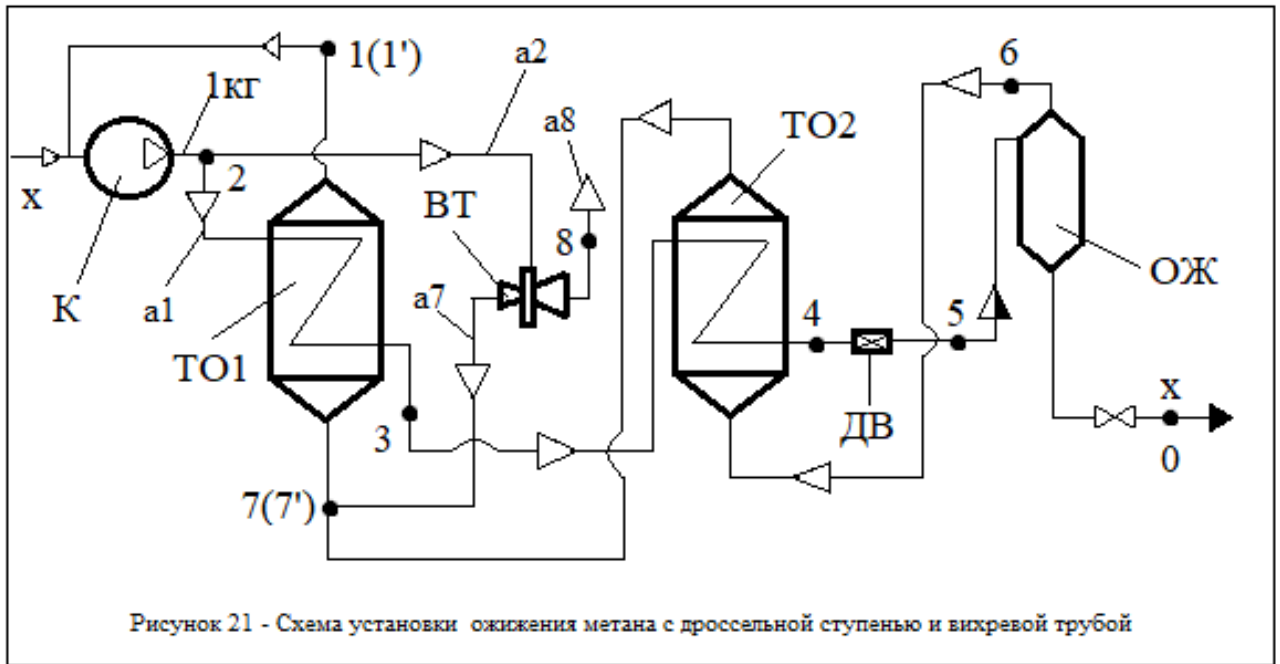
Рисунок 20 - T-S диаграмма простейшего дроссельного цикла с предварительным охлаждением

3.3 Установка с дроссельной ступенью и вихревой трубой

Одним из улучшений установок, работающих по дроссельному циклу, является цикл с вихревой трубой и дроссельной ступенью. Также при использовании каскадного метода расположения труб, появляется значительное разнообразие места расположения вихревой трубы. Роль внешнего источника охлаждения в данной двухступенчатой установке играет вихревая труба.

Метан, сжавшись до высокого давления в компрессоре, разделяется на поток a_1 и a_2 . Поток a_1 направляется в теплообменник ТО1, где охлаждается, другой же поток a_2 отправляется на вихревую трубу, где разделяется на 2 части: a_7 – холодный поток, a_8 – тёплый поток. Поток a_7 направляется в теплообменник ТО1, являясь при этом обратном потоком, где используется для охлаждения потока a_1 . Тёплый поток a_8 выходит из установки. Выходя из теплообменника ТО1, поток a_1 поступает в теплообменник ТО2, где снова охлаждается. Далее поток попадает на дроссельный вентиль ДВ, где дросселируется до низкого давления. Образовавшийся в результате дросселирования парожидкостной поток отправляется в отделитель жидкости ЖД, где жидкая часть выходит из установки, а сухая отправляется по обратному потоку в теплообменники ТО1 и ТО2, где нагревается. Выйдя из теплообменника ТО1 этот поток вновь попадает в компрессор.

Наибольшая польза от использования вихревой трубы проявляется при высоких и средних давлениях. Схема установки изображена на рисунке 21.

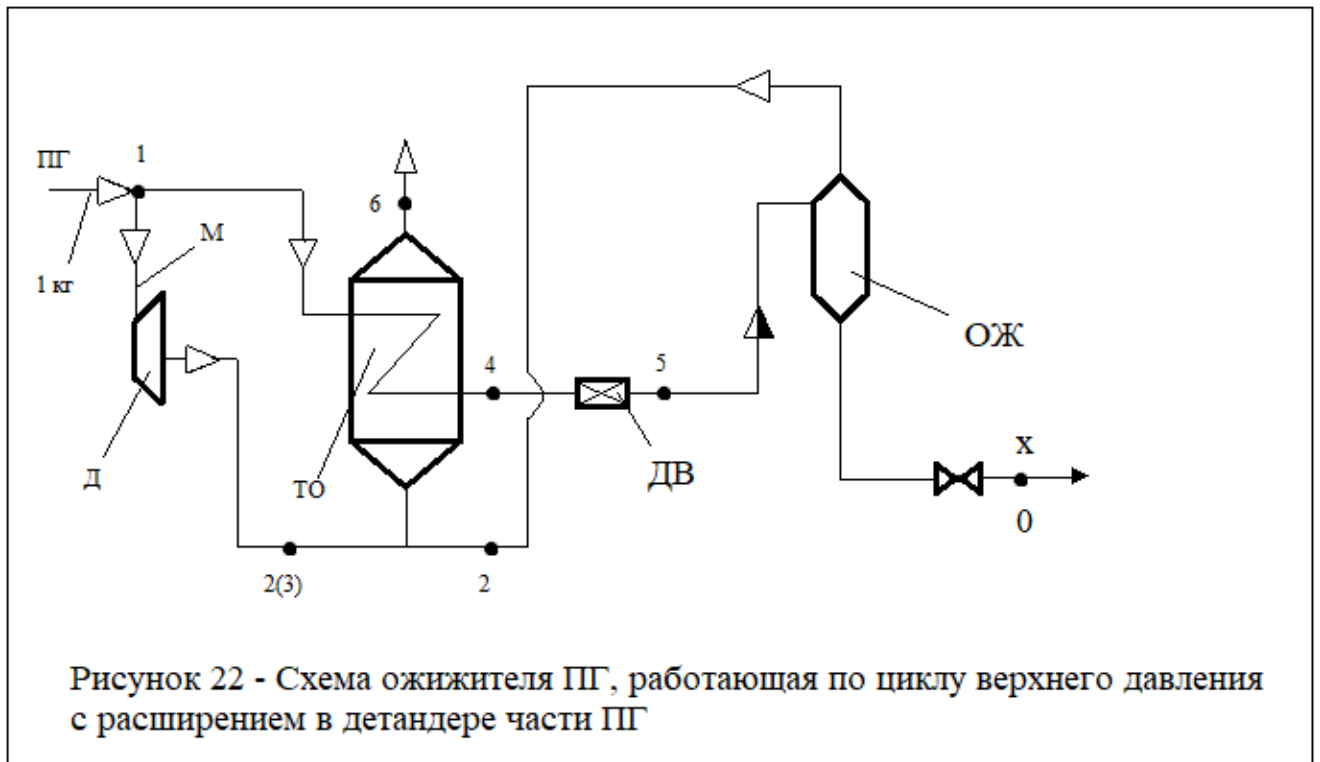


3.4 Установка высокого давления с детандером

Цикл, по которому работает эта установка, является циклом высокого давления, и в основном применяется исключительно для метана.

В начале цикла ПГ направляется в крио-блок, где часть газа идёт на детандер, где впоследствии расширяется, теряя при этом уровень давления до низкого состояния. Оставшаяся часть газа охлаждается в теплообменнике ТО до температуры в точке 4, откуда потом поступает на дроссельный вентиль, где дросселируется и затем в виде парожидкостного потока попадает в отделитель жидкости, откуда жидкая часть газа сливается из установки, а сухая выводится по обратному потоку, впоследствии смешиваясь с частью газа из детандера.

Схема установки представлена на рисунке 22.



3.5 Детандерный цикл на основе цикла Клода

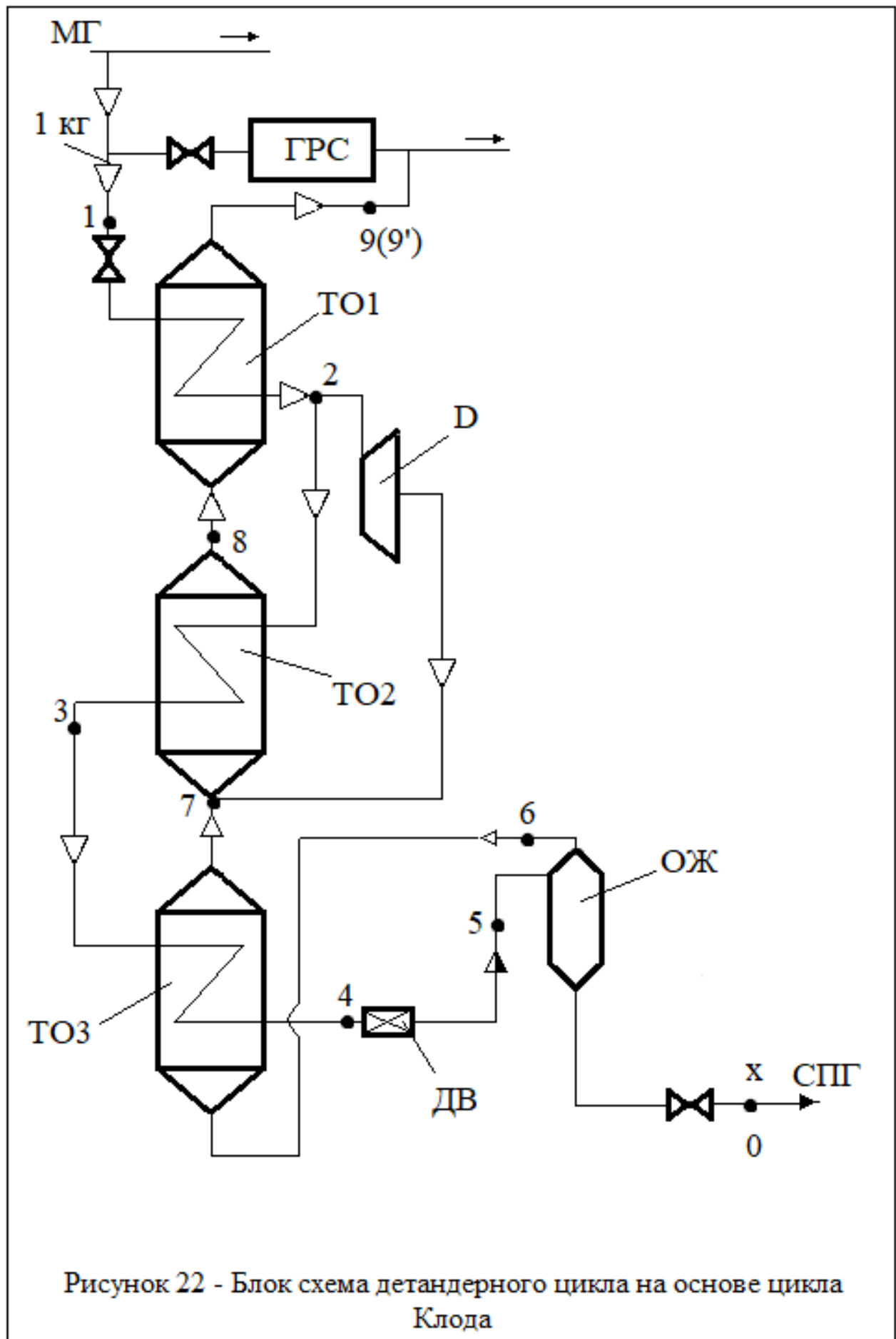
В текущий момент наибольшей популярностью пользуются дроссельные циклы среднего давления с детандерным расширением. Такая актуальность обосновывается тем, что данные ожижители могут работать при использовании перепада давлений на ГРС магистральных газопроводов. Данный тип ожижителей также имеет большую эффективность, по сравнению с дроссельными или вихревыми ожижителями.

На рисунке 22 изображена упрощенная схема цикла производства СПГ на ГРС с использованием цикла Клода, являющегося циклом среднего давления. В целом преимущество этого цикла состоит в отсутствии необходимости использовать компрессор для сжатия газа, что сводит удельные энергетические затраты практически к нулю.

Рассматриваемый цикл является двухступенчатым. В отличие от остальных циклов, здесь метан поступает не из компрессора, а из магистрального

трубопровода. Первая ступень называется детандерная, и состоит из теплообменника ТО1 и теплообменника ТО2. В ней поток газа среднего давления поступает из магистрального трубопровода 1, и направляется в теплообменник ТО1. После чего поток газа разделяется на 2 части. Одна часть идет на детандер, где расширяется до давления, равного давлению в обратном потоке, за счёт чего и охлаждается. Другая же часть идёт в теплообменник ТО2, где также охлаждается. Вторая ступень цикла называется дроссельной, и состоит из теплообменника ТО3, дросселя 5 и сборника СПГ 6, являющего отделителем жидкости. Поток газа, охлаждённый в ТО3, дросселируется в дросселе до давления обратного потока, равного давлению в газораспределительном трубопроводе. После прохождения через дроссель образуется парожидкостная смесь, которая далее разделяется в сборнике СПГ. Получившийся СПГ сливается, а несконденсированная часть газа отправляется по обратному потоку. Эффективность дросселя в сравнении с турбодетандером ниже, так как в последнем совершается газ расширяется, совершая работу, и из-за этого охлаждается больше.

В силу того, что данный цикл не нуждается в задействовании компрессора, за счёт чего и позволяет уменьшить энергозатраты в пользу эффективности, он будет в дальнейшем использоваться для термодинамического расчёта с целью определения режимных параметров критерия оптимальности в виде коэффициента ожижения.



4 ОЖИЖИТЕЛИ ПРИРОДНОГО ГАЗА И МИНИ-ЗАВОДЫ СПГ

4.1 Модернизированный ожижитель ПГ на базе АГНКС

В данном параграфе предлагается рассмотрение модернизированного современного ожижителя ПГ. Суть отличия от обычного ожижителя ПГ на базе АГНКС состоит в прибавлении к схеме установки двухступенчатой холодильной машины с хладагентом R22.

В данной установке газ, сжимаясь в компрессорах до высокого давления, отправляется далее в адсорбционный блок, где очищается от различных примесей, в том числе и от углекислого газа, а также осушается, после чего проходит теплообменники ТО1 и попадает в холодильную машину, где последовательно проходит этапы испарения и конденсации. Выйдя из холодильной машины, поток газа проходит теплообменники ТО2 и ТО3 друг за другом, после чего выходит на дроссель, где дросселируется с понижением давления. После дросселя следует отделитель жидкости, где жидкая часть парожидкостной смеси выводится из установки, а сухая отправляется по обратному потоку через теплообменники ТО1, ТО2 и ТО3 обратно в компрессор, где снова поступает на сжатие.

Применение холодильной машины в данной установке оправдывается повышением производительности в 3 раза и коэффициента ожижения в 4 раза.

Схема представлена на рисунке 23.

4.2 Ожижительные установки на ГРС

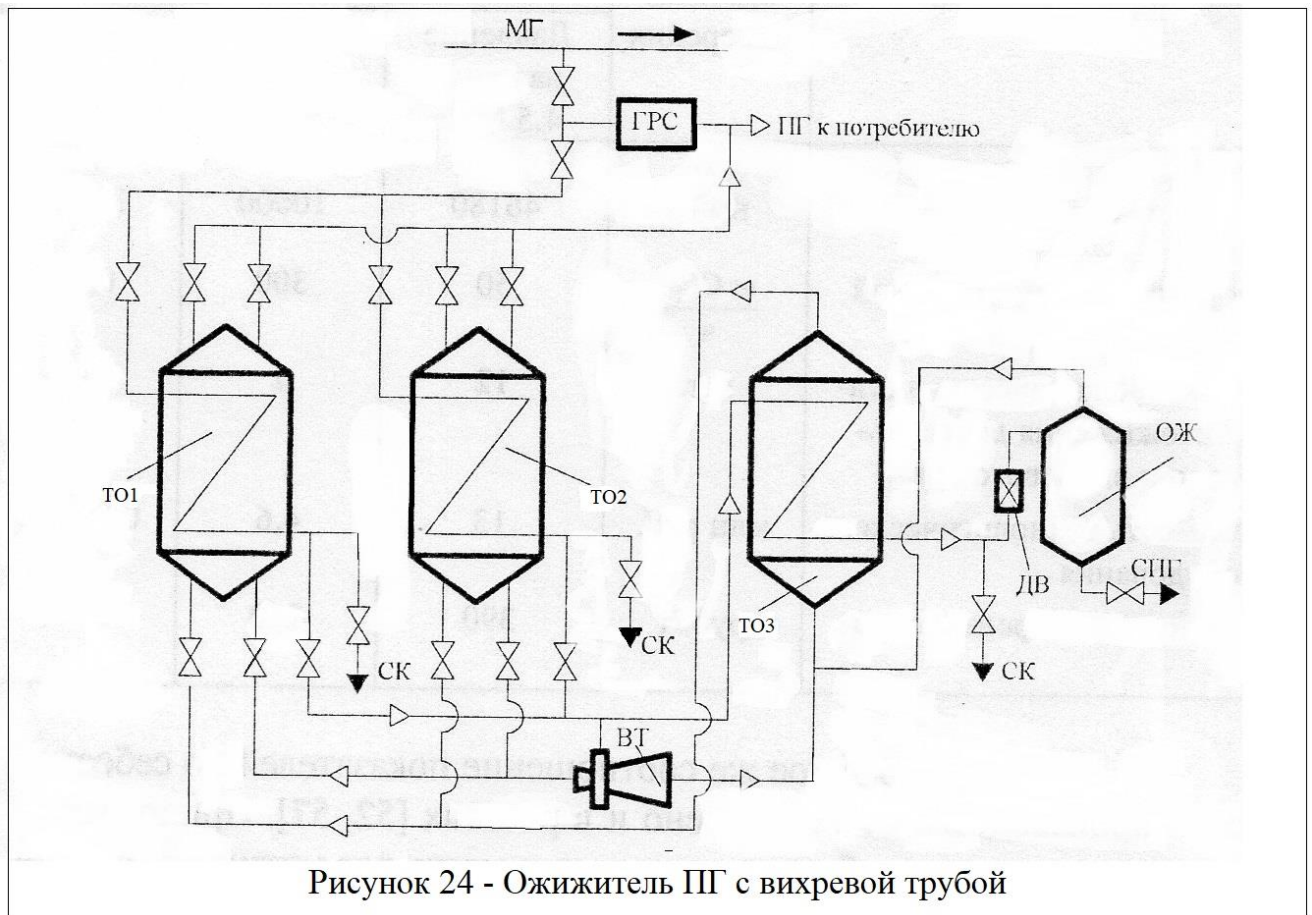
Как уже было сказано ранее, сжижение природного газа на ГРС является достаточно экономичным в силу отсутствия задействования компрессора для сжатия газа, что делает установки ожижителя ПГ на ГРС более привлекательными, чем на АГНКС.



4.2.1 Ожижитель ПГ на ГРС с вихревой трубой

В этой установке задействуется магистральный трубопровод, являющийся источником природного газа, откуда газ поступает в крио-блок и оттуда проходит теплообменники ТО1 и ТО2, где при помощи охлаждения избавляется от влаги. Во время данного процесса из вихревой трубы ВТ выходит холодный газ, который смешивается с ПГ из ТО3, и в дальнейшем охлаждает теплообменники ТО1 и ТО2, служащие в качестве вымораживателей и осушителей. В ТО3 окончательно охлаждается поток ПГ, после чего он выходит на дроссель и дросселируется оттуда в отделитель жидкости. Оттуда жидкая часть дросселированного потока газ сливается, а сухая часть отправляется по обратному потоку в ТО3, где охлаждается для дальнейшего использования в качестве охладителя прямого потока ПГ. Вихревая труба в этой установке также помогает очищать теплообменники ТО1 и ТО2 от льда, путём отогрева.

Принципиальная схема представлена на рисунке 24.



4.2.2 Ожижитель ПГ типа УСНП 00.000

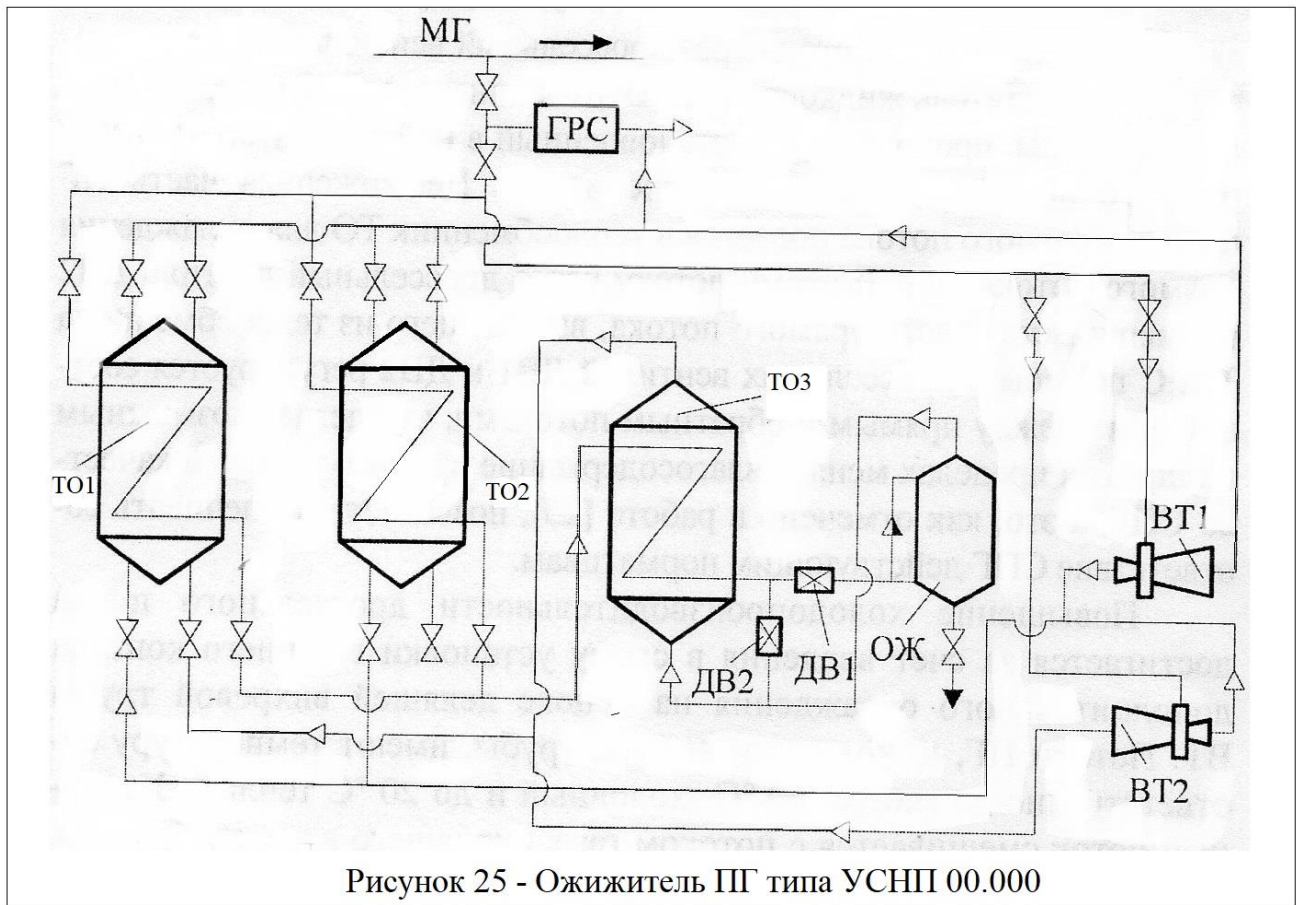
Данный тип ожижителей похож на предыдущую модель, но отличие состоит в добавлении дополнительной ступени внешнего охлаждения с помощью второй вихревой трубы и дроссельного вентиля.

Как и в предыдущей установке ПГ попадает в вымораживающие теплообменники, где опять же происходят процессы конденсации влаги. Далее поток газа направляется в ТОЗ, где после охлаждения разделяется на 2 потока. Первый поток проходит через дроссельный вентиль в отделитель жидкости, где как обычно жидкая часть в виде готового СПГ отделяется и выводится из установки, а сухая, идя по обратному потоку и охлаждаясь в ТОЗ используется для охлаждения газа, идущего по прямому потоку. Нововведением в данном типе ожижителей является

подключения дросселя ДВ2 для смешивания этой сухой части с прямым потоком из ТО3, что позволяет регулировать влажосодержание в прямом потоке, позволяя получать СПГ нужной чистоты.

Преимуществом данной установки является снижение финансовых затрат, но при этом отмечается недостаток в виде невысокого коэффициента ожижения величиной приблизительно 0.05.

Схема представлена на рисунке 25.

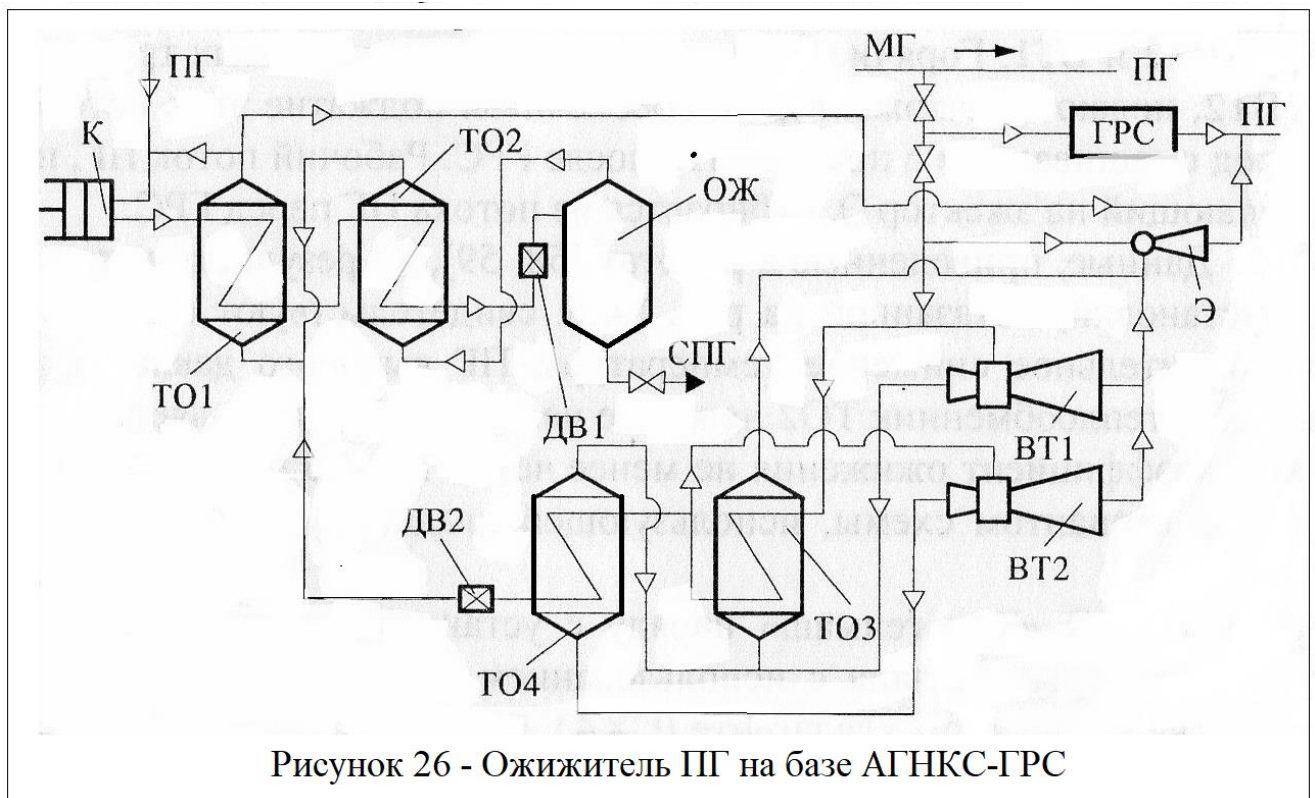


4.2.3 Ожижитель ПГ на базе АГНКС – ГРС

Данная схема представляет собой уже вид усовершенствованного мини-завода и предназначена исправить недостатки предыдущей модели. Здесь поток газа поступает из компрессора и из магистрального трубопровода.

Как уже было описано ранее, в компрессоре газ сжимается до высокого давления и проходит теплообменники ТО1 и ТО2, после чего дросселированием подаётся в отделитель жидкости, где делится на сливающуюся жидкую часть и отправляющуюся по обратному потоку и подогревающуюся для повторного сжатия сухую часть. Во второй части установки, газ, выходя из МГ разделяется на 2 потока, где первая часть минует ТО3 и ТО4, а после при помощи дросселирования смешивается с обратным потоком, вторая же часть идёт на вихревую трубу ВТ2. Две вихревые трубы позволяют дополнительно охлаждать прямой поток.

Схема представлена на рисунке 26.



5 ПРОВЕДЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЁТА

5.1 Термодинамический расчёт процесса сжижения ПГ на ГРС

Цель:

- Определение коэффициента ожижения x
- Определение доли детандерного потока M .

Примечания:

- Удельные затраты энергии в данном цикле равны нулю, это объясняется отсутствием компрессора.
- Приведены давления прямого и обратного потоков, которые определяются давлениями газа в магистральном и распределительном трубопроводах.
- Известна температура газа при поступлении в установку.
- Известна производительность установки по СПГ.
- Адиабатный КПД детандера лежит в диапазоне 0.75-0.81

Для расчёта будут использоваться диаграмма T-S и упрощённая схема детандерного цикла среднего давления на основе цикла Клода, изображённые на рисунках 23 и 24.

Основой термодинамического расчёта являются уравнения теплового и материального баланса для сечений 1,2,3:

$$1 + i_1 + (1 - M - x) \cdot i_7 = (1 - M) \cdot i_3 + (1 - x) \cdot i_9 + M \cdot l_D,$$

$$(1 - M) \cdot i_3 = (1 - M - x) + x \cdot i_f,$$

$$i_1 + (1 - x) \cdot i_8 = i_2 + (1 - x) \cdot i_8$$

$$(1 - M) \cdot i_2 + (1 - x) \cdot i_{33} = (1 - M) \cdot i_{22} + (1 - x) \cdot i_8,$$

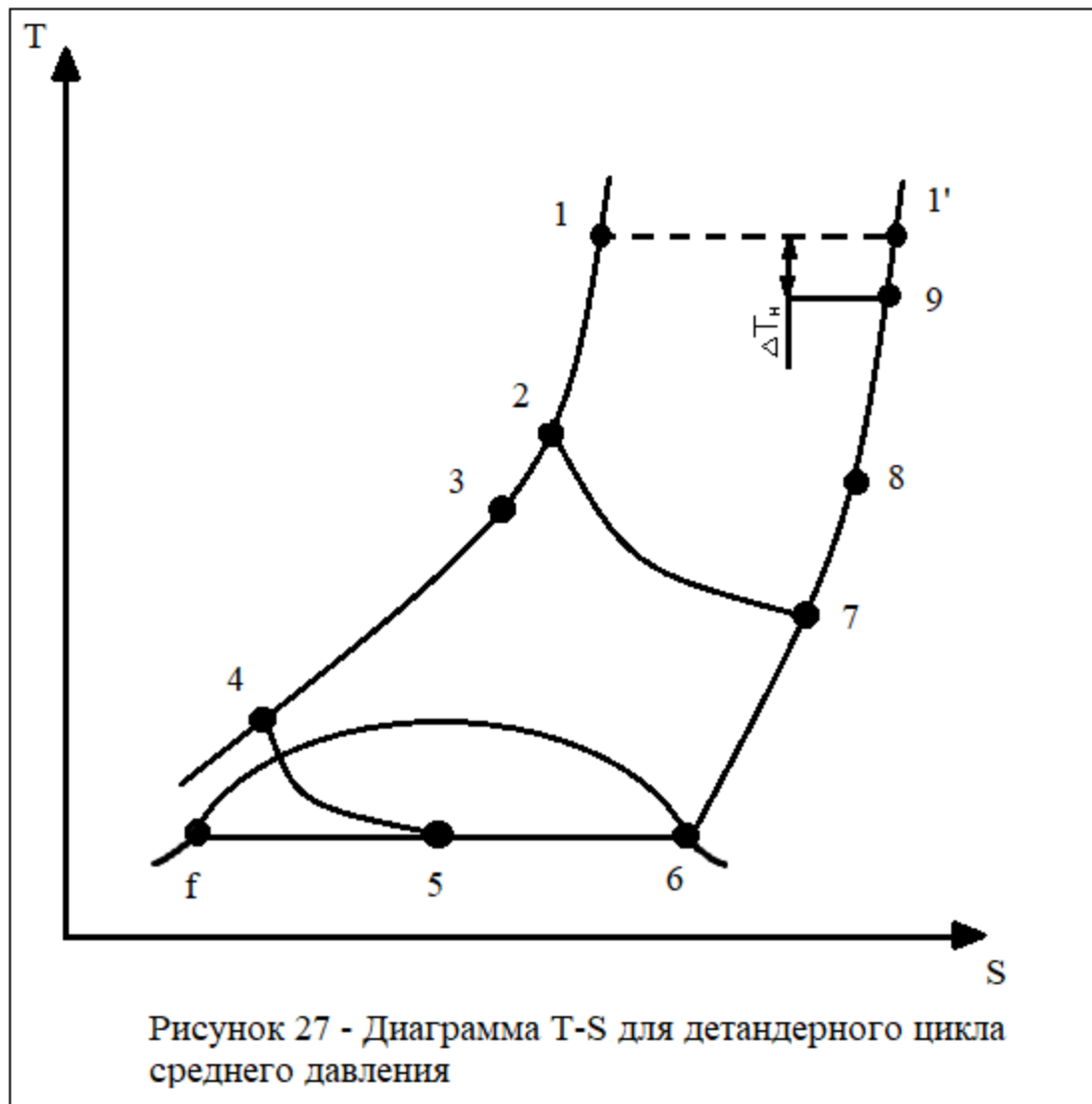
где:

1,2,3 - индексы сечений;

l_D – работа детандера;

M - доля детандерного потока;

x - коэффициент ожижения



Целью расчёта данной системы уравнений является определение значений $i_2, i_3, i_7, i_8, i_9, M$ и x , при системе, состоящей из 4-х уравнений.

Величины, которыми также следует задаться:

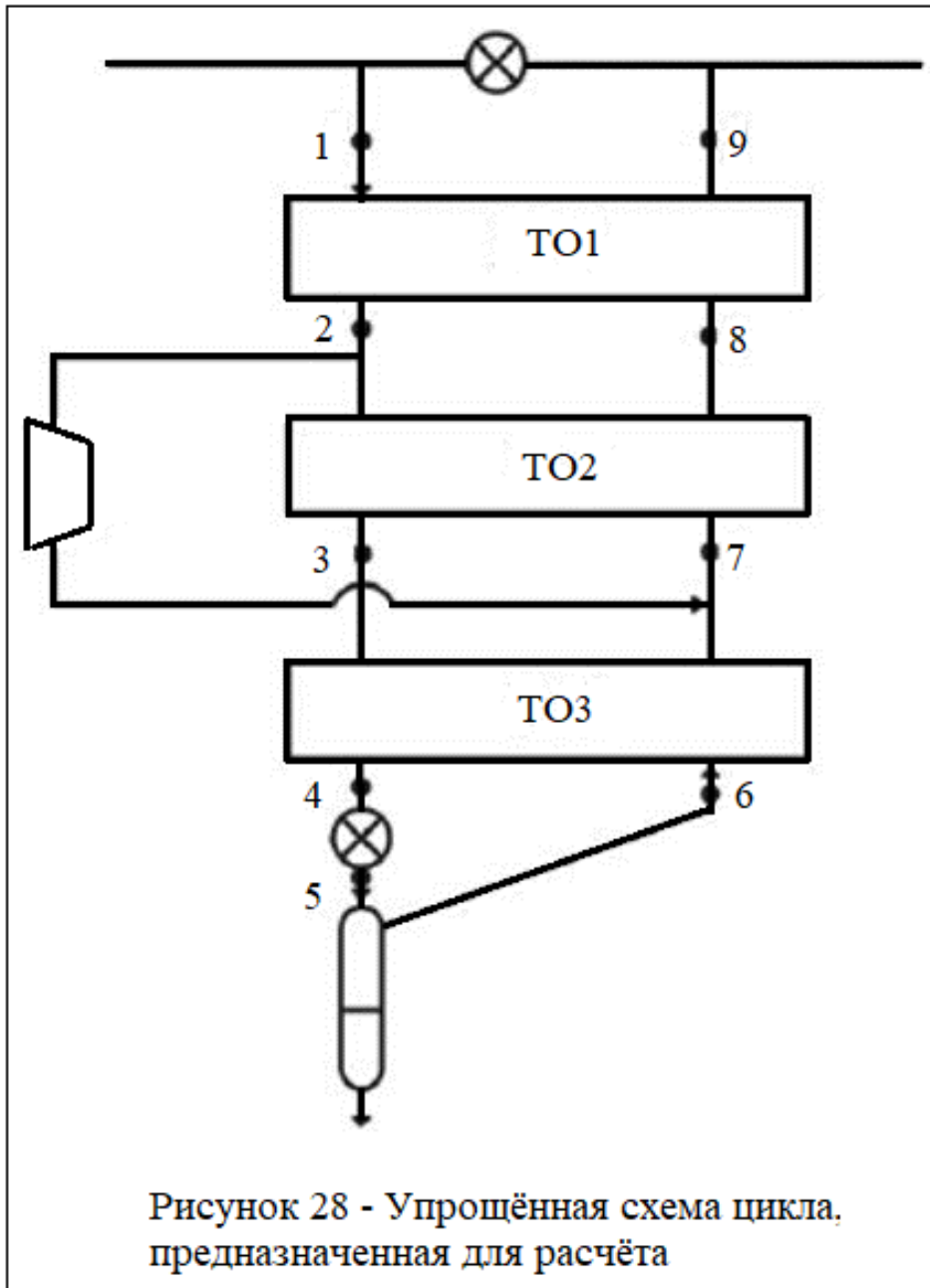
i_9 – значение энтальпии (температуры) обратного потока на выходе из установки;

$i_3 - i_7$ - разность энтальпий в точках 3 и 7

T_2 – температура газа перед детандером

i_{22} – равна значению энтальпии насыщенного пара при температуре T_5

$$T_{22} = T_5 - 1$$



$T_{22} = T_s - 1$ выбирается с условием, чтобы ΔT_{min} принимала минимальное значение, тогда коэффициент χ будет достигать максимального значения, при достаточной доле детандерного потока.

Результаты термодинамического расчёта представлены в таблице 2.

Наблюдая переменную зависимость коэффициента сжижения от температуры газа перед детандером можно наблюдать, что коэффициент χ принимает максимальное значение равное 0.129, которое и соответствует заданному в начале работы критерию оптимальности. Это объясняется тем, что при последующем

увеличении температуры газа перед детандером, идущий от обратного потока холод не передаётся до конца прямому потоку, отчего недорекуперационные потери начинают резко возрастать, а коэффициент ожигения начинает идти по наклонной линии и постепенно сокращается.

Судя по данной зависимости коэффициент ожигения падает на 32% при увеличении температуры перед детандером за границей оптимального значения (225 К). Данную зависимость можно наблюдать на рисунке 25.

Таблица 2 – Результаты термодинамического расчёта

Давление прямого потока, МПа	P_m	3.5	3.5	3.5	3.5
Давление обратного потока, МПа	P_n	0.6	0.6	0.6	0.6
Температура прямого потока в сечении 1, К	1	293	293	293	293
Температура прямого потока в сечении 2, К	2	215	225	230	240
Температура прямого потока в сечении 3, К	3	148	156	160	168
Температура прямого потока в сечении 4, К	4	146	150	152	156
Температура обратного потока в сечении 1, К	7	283	283	275	257
Температура обратного потока в сечении 2, К	8	178	192	192	191
Температура обратного потока в сечении 3, К	9	143	151	155	163
Минимальная разность температур в детандерном теплообменнике, К	$\text{Min } D_t$	5.00	1.74	1.22	1.24
Доля детандерного потока	M	0.86	0.82	0.85	0.88
Коэффициент ожигения	x	0.122	0.129	0.116	0.081

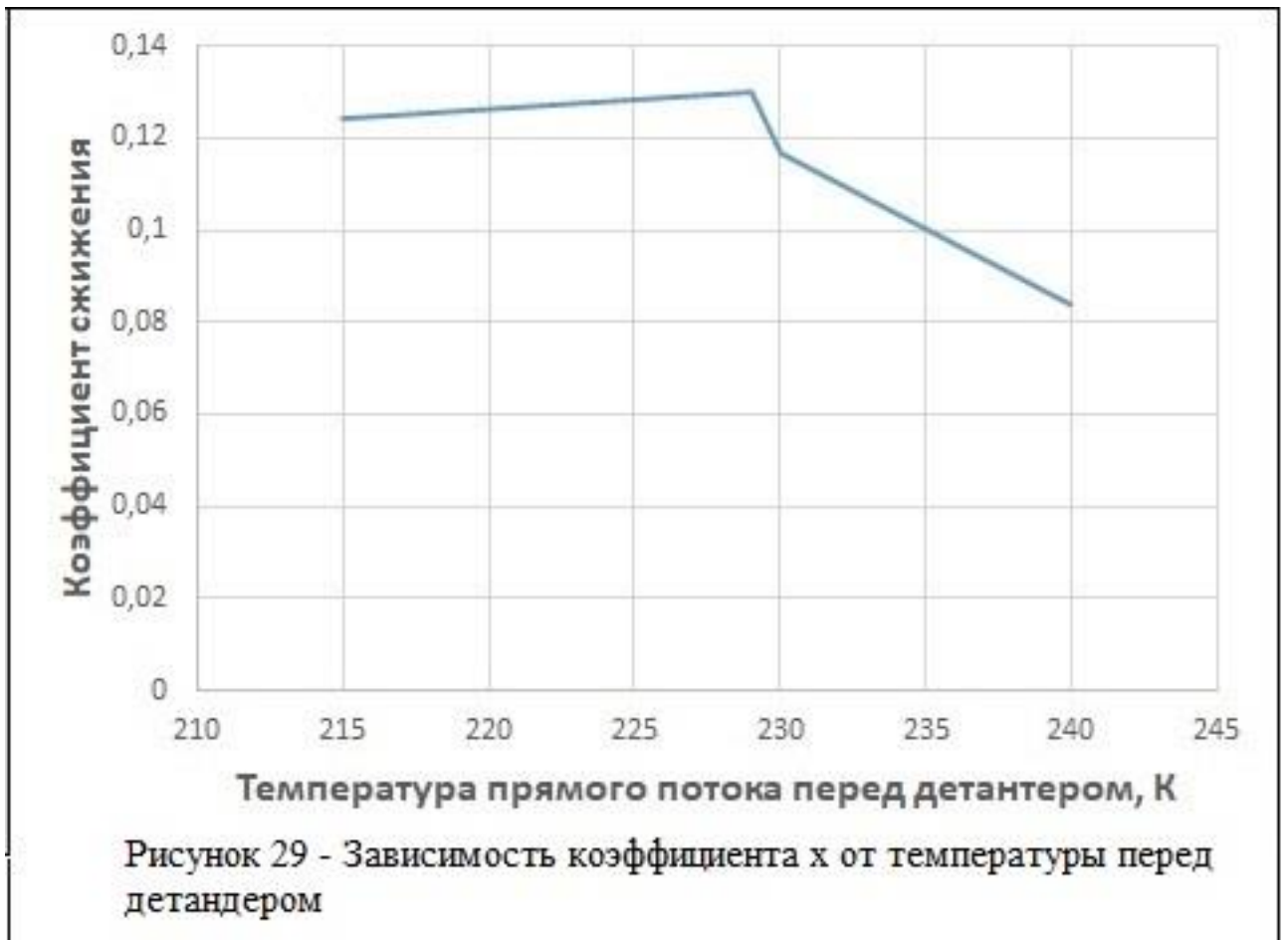
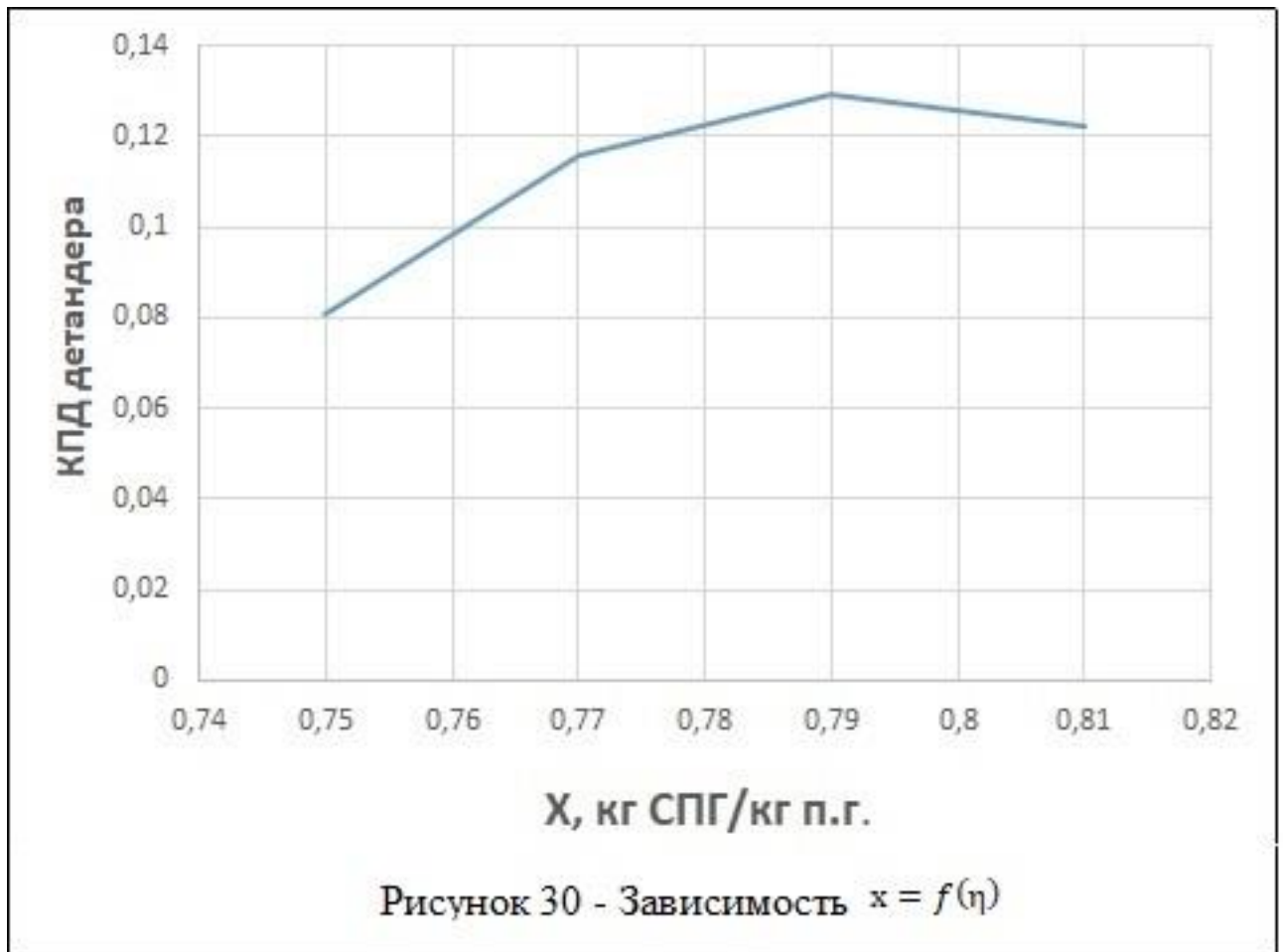


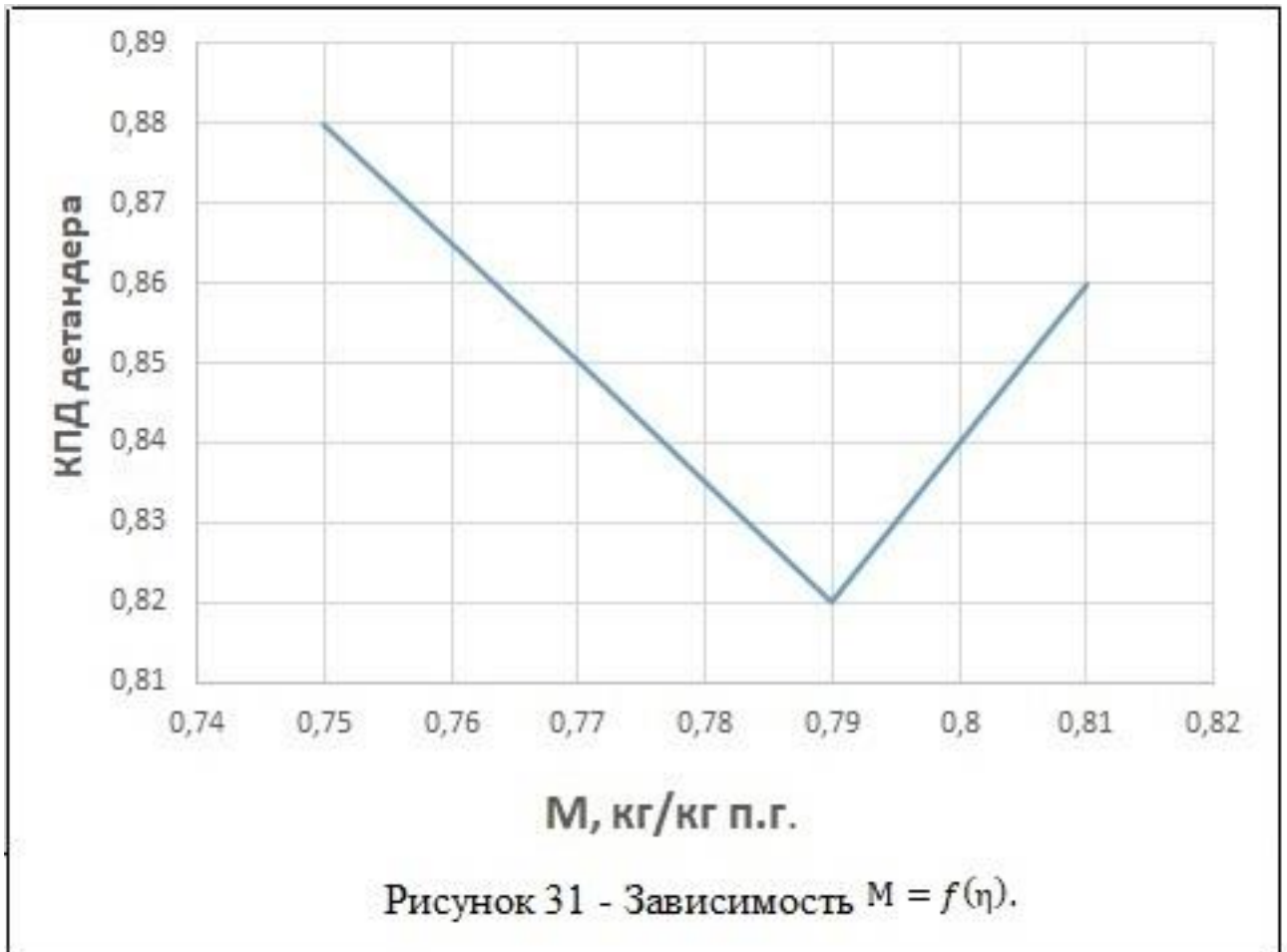
Таблица 3 - Сводные данные расчёта установки

$\eta_{ад}$	$\Delta T_{min}, K$	$M, \frac{кг}{кг \text{ п.г.}}$	$x, \frac{кг \text{ СПГ}}{кг \text{ п.г.}}$
0.75	1.24	0.88	0.081
0.77	1.22	0.85	0.116
0.79	1.74	0.82	0.129
0.81	5.00	0.86	0.122

Из данных таблицы 3 следует, что при увеличении КПД детандера с 0.75 до 0.79 происходит рост коэффициента ожижения на уровне 8-13%, однако при достижении значения КПД детандера 0.81 происходит уменьшение коэффициента x . Также снижается доля детандерного потока M , и повышается при КПД равном 0.81.

Данные изменения можно наблюдать при построении зависимости $x = f(\eta)$ и $M = f(\eta)$.





5.2 Выводы

- Определены режимные параметры, при которых коэффициент ожижения достигает максимального значения, соответствующего оптимальному режиму работы.
- Выяснено, что в работе установки СПГ на ГРС при неоптимальных режимных параметрах происходит снижение эффективности установки на 32%.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

ГРС – газораспределительная станция

ПГ – природный газ

СПГ – сжиженный природный газ

К – компрессор

Д – детандер

ТО - теплообменник

ВТ – вихревая труба

ОЖ – отделитель жидкости

ДВ – дроссельный вентиль

КПД – коэффициент полезного действия

x – коэффициент ожижения

M – доля детандерного потока

i – энтальпия Кдж/кг

T – температура, К

МГ – магистральный трубопровод

АГНКС - Автомобильная газонаполнительная компрессорная станция

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титов Г. Н. Совершенствование технологической схемы ожижителя природного газа для газораспределительной станции. 2019 г.
2. Акулов Л. А. Установки и системы низкотемпературной техники. Ожижение природного газа и утилизация холода сжиженного природного газа. Учеб. Пособие.- СПб: СПбГУНиПТ. 2006 г
3. [Электронный ресурс] https://ru.wikipedia.org/wiki/Сжиженный_природный_газ
4. [Электронный ресурс] <https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/141460-szhizhennyu-prirodnyu-gaz-spg-tehnologii-szhizheniya/>
5. [Электронный ресурс] <https://lngas.ru/about-lng>
6. Климентьев А. Ю., Митрова Т.А., Собко А. А. (ред.) Возможности и перспективы развития малотоннажного СПГ в России. М.: Московская школа управления Сколково, 2018. — 187 с
7. А.М. Архаров и др. Теория и расчет криогенных систем.-М.: Машиностроение, 1978.- 415 с.
8. Федорова Е. Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии и оборудование. М.: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2011. — 159 с.
9. [Электронный ресурс] <https://neftegaz.ru/tech-library/oborudovanie-dlya-sbora-i-podgotovki-nefti-i-gaza/141465-gazoraspredelitelnaya-stantsiya-grs/>
10. [Электронный ресурс] <https://helpiks.org/6-60946.html>
11. [Электронный ресурс] https://studopedia.ru/7_24414_klassifikatsiya-i-struktura-grs.html
12. Краковский Б. Д. и др. Современные технологии сжижения природного газа в установках малой и средней производительности //Использование сжиженного природного газа на железнодорожном транспорте. Материалы заседания секции Научно-технического совета ОАО «Газпром». - М: ООО ИРЦ Газпром. - 2010. - С.70 - 79.

17. Бармин И.А. Сжиженный природный газ. Вчера, сегодня и завтра // МГТУ им. Н. Э. Баумана. - 2009.

18. Сжиженный природный газ // Справочник по физико-химическим, энергетическим и эксплуатационным свойствам, под редакцией Ходаркова И. Л. // Химиздат. Санкт-Петербург. - 2012. - С. 77.