



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
**(ДФУ)**

---

**Инженерная школа**

**Кафедра Нефтегазового дела и нефтехимии**

Левченко Любовь Евгеньевна

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ШЕЛЬФОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
«ПРИРАЗЛОМНОЕ» СВЕРХЗВУКОВЫМИ СЕПАРАТОРАМИ**

**Направление подготовки 21.03.01 Нефтегазовое дело**  
Профиль «Сооружение и ремонт объектов систем трубопроводного  
транспорта»  
**Бакалаврская работа**

г. Владивосток  
2020

Студент Левченко Л.Е.  
(ФИО, подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020г.

Руководитель ВКР

ст. преподаватель  
(ученая степень, должность)

Власенко В.С.  
(подпись) (ИОФ)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020г.

**«Допустить к защите»**

Руководитель ОП к.г.н., доцент  
(ученая степень, должность)

А.В.Никитина  
(подпись) (ИОФ)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020г.

Консультант по Промышленной и экологической безопасности

к.т.н., профессор  
(ученая степень, должность)

Е.В. Нисковская  
(подпись) (ИОФ)

« 02 » июня 2020г.

Зав. кафедрой д.т.н., профессор  
(ученая степень, должность)

А.Н. Гульков  
(подпись) (ИОФ)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020г.

Консультант по Экономике

к.э.н., профессор  
(ученая степень, должность)

С.Г. Гулькова  
(подпись) (ИОФ)

« 3 » июня 2020г.

В материалах ВКР не содержатся/содержатся  
(нужное подчеркнуть) сведения, составляющие  
государственную /коммерческую тайну и  
подлежащие экспортному контролю  
Уполномоченный по экспортному контролю

\_\_\_\_\_ (подпись) \_\_\_\_\_ (ФИО)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020г.

Нормоконтроль

к.т.н., доцент  
(ученая степень, должность)

Л.В. Андреева  
(подпись) (ИОФ)

« 15 » июня 2020г.

**Защищена в ГЭК с оценкой \_\_\_\_\_**

Секретарь ГЭК к.т.н., доцент  
(ученая степень, должность)

Л.В. Андреева  
(подпись) (ИОФ)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020г.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

**«Дальневосточный федеральный университет»**

**Инженерная школа**

Кафедра нефтегазового дела и нефтехимии

«СОГЛАСОВАНО»

Руководитель ООП,

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Зав. кафедрой НГДиНХ, д.т.н., проф.

А.Н. Гульков

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

### **З А Д А Н И Е**

**на выполнение выпускной квалификационной работы  
(бакалаврской работы)**

**по направлению подготовки 21.03.01 Нефтегазовое дело,  
профиль «Сооружение и ремонт объектов систем трубопроводного  
транспорта»**

Студент (Ф.И.О.) Левченко Любовь Евгеньевна группа Б3116-21.03.01срстг

**1. Тема ВКР:** «Модернизация шельфового месторождения «Приразломное» сверхзвуковыми сепараторами»

**2. Направленность** квалификационной работы: проектная  
проектная, исследовательская

**3. Тематика ВКР:** академическая  
предложена студентом, по заявке предприятия, в области фундаментальных исследований, академическая

**4. Перечень разрабатываемых вопросов (структура ВКР):**

1. Общие сведения шельфового месторождения «Приразломное»; 2. Описание технологической схемы установки; 3. Исследование технологии сверхзвуковой сепарации; 4. Научная глава «Комбинированный сверхзвуковой сепаратор»; 5. Расчёт сверхзвукового и комбинированного сверхзвукового сепараторов; 6. Разработка мероприятий по обеспечению безопасности персонала; 7. Разработка мероприятий по снижению негативного воздействия на окружающую среду; 8. Расчёт стоимости внедрения технологии.

**5. Перечень графического материала (с указанием чертежей):**

1. Ситуационный план месторождения

2. Технологическая схема нефтедобывающей платформы

3. Технологическая схема узла сепарации

4. Схема сверхзвукового сепаратора

5. Схема комбинированного сверхзвукового сепаратор

6. Экономические показатели проекта

Дополнительные указания: \_\_\_\_\_

наличие презентации, выполнение научной главы в виде статьи, патентный поиск и т.д.  
7. Календарный график выполнения ВКР

№ п/п	Наименование этапов	Срок выполнения	Примечание
1	Общая часть (10%)	11.05.2020	
2	Научная глава (15 %)	17.05.2020	
3	Расчетная глава (25%)	22.05.2020	
4	Технологическая часть (25 %)	25.05.2020	
5	Промышленная и экологическая безопасность (10 %)	28.05.2020	
6	Экономические расчеты (15 %)	02.06.2020	
7	Предзащита (100%)	05.06.2020	

Дата выдачи задания \_\_\_\_\_

Срок представления к защите \_\_\_\_\_

Руководитель ВКР Власенко Виктор Сергеевич  
ФИО, подпись, дата

Студент Левченко Любовь Евгеньевна  
ФИО, подпись, дата

## Аннотация

В рамках данной бакалаврской работы разрабатывается проект по внедрению технологии сверхзвуковой сепарации на МЛСП «Приразломная».

Рассматриваются общие положения о месторождении, его климатические, геологические и сейсмические свойства. Производится определение параметров газа на платформе.

Исследуется сверхзвуковой сепаратор, его схема и принцип работы. А также рассматривается схема подключения аппарата к газотурбинным генераторам. Проводится конструктивный расчёт и моделирование процесса сепарации сверхзвукового аппарата в ПО Unisim Design. В научной главе предлагается альтернатива сверхзвуковому сепаратору – комбинированный сверхзвуковой сепаратор (КСС), разработанный и запатентованный специалистами кафедры ДВФУ, его схема и принцип работы.

Проводится экономический расчёт внедрения установки на платформу.

## **The abstract**

As part of this bachelor's work, a project is being developed to introduce supersonic separation technology at the Prirazlomnaya FSPO.

General provisions about the Deposit, its climatic, geological and seismic properties are considered. It is determined by the parameters of gas on the platform.

The supersonic separator, its scheme and working principle are studied. The scheme of connecting the device to gas turbine generators is also considered. A constructive calculation and simulation of the separation process in a supersonic vehicle in Unisim is carried out. The scientific Chapter offers an alternative to the supersonic separator-a combined supersonic separator (CSS), developed and patented by specialists of the FEFU Department, its scheme and principle of operation.

The economic calculation of the installation implementation on the platform is performed.

## Содержание

Введение .....	4
1 Общая часть.....	5
1.2 Общие сведения месторождения «Приразломное».....	5
1.3 Климатические условия региона .....	7
1.4 Анализ геологических условий района.....	8
1.5 Сейсмичность региона .....	9
2 Технологическая часть.....	10
2.1 Характеристики МЛСП «Приразломная».....	10
2.2 Сбор и подготовка нефти и газа .....	10
2.2.1 Газотурбинные генераторы .....	12
2.3 Исследование сверхзвукового сепаратора .....	12
2.4 Испытание сверхзвукового сепаратора на месторождении «Заполярье» .....	15
3 Расчётная часть.....	18
3.1 Характеристика исходного сырья .....	18
3.2 Расчёт сверхзвукового сопла Лавалья .....	19
3.3 Моделирование процесса сверхзвуковой сепарации в ПО Unisim Design .....	25
4 Научная глава .....	27
4.1 Исследование комбинированного сверхзвукового сепаратора .....	27
4.2 Расчёт сопла Лавалья комбинированного сверхзвукового сепаратора....	29
5 Промышленная и экологическая безопасность .....	31
5.1 Охрана труда и техника безопасности .....	31
5.1.1 Правила пожарной безопасности .....	33
5.2 Мероприятия по охране окружающей среды .....	34
5.2.1 Охрана атмосферного воздуха.....	34
5.2.2 Мероприятия по охране гидросферы .....	35
5.2.3 Мероприятия по охране недр.....	37
6 Экономическая часть .....	40
6.1 Расчёт основных экономических показателей сверхзвукового сепаратора.....	40

6.2 Затраты на оплату труда .....	41
6.3 Амортизационные отчисления .....	42
6.4 Затраты на текущий ремонт .....	42
6.5 Прочие затраты.....	42
6.6 Экономическая эффективность .....	43
6.7 Чистый дисконтированный доход проекта.....	43
6.8 Окупаемость .....	45
Заключение .....	46
Список литературы .....	47
Приложение А .....	54



## Введение

При освоении северных месторождений перед нефтегазовыми компаниями встает ряд проблем, препятствующих дальнейшей их разработке.

В процессе нефтедобычи в составе продукции присутствует попутный нефтяной газ (ПНГ), его утилизация также является актуальной проблемой для нефтяных компаний, т.к. его сжигание приводит к большим потерям ценных компонентов – легких жидких углеводородных фракций, являющихся сырьём для получения нефтехимических продуктов, а также негативное влияние на окружающую среду.

Для рационального использования ПНГ требуется разработка и внедрение технологий сепарации нефти, сбора и утилизации попутного нефтяного газа с учетом уже сложившейся инфраструктуры района добычи.

Целью работы является внедрение сверхзвукового сепаратора перед газотурбинными генераторами, для подготовки ПНГ перед сжиганием, сепарация вредных примесей, а также отделение углеводородного сырья на продажу.

Вредные примеси при сжигании в атмосферу будут выделяться гораздо меньше после установки аппарата, оборудование будет служить дольше и углеводороды, отделившиеся в результате сепарации будут сливаться в нефтехранилище для продажи.

Основные задачи исследования:

1. Определение параметров газа на МЛСП «Приразломная»;
2. Конструктивный расчёт аппарата;
3. Моделирование структуры газожидкостного потока в сверхзвуковом сепараторе;
4. Экономическое обоснование процесса сепарации;

# 1 Общая часть

## 1.2 Общие сведения месторождения «Приразломное»

Приразломное месторождение – первый российский проект по добыче углеводородов на шельфе Арктики. Месторождение принадлежит компании ООО «Газпром нефть шельф», открыто в 1989 году. Расположено в Печорском море, в 58 км к северо-западу от Варандея, в 980 км от морского порта Мурманска (рисунок 1.1).

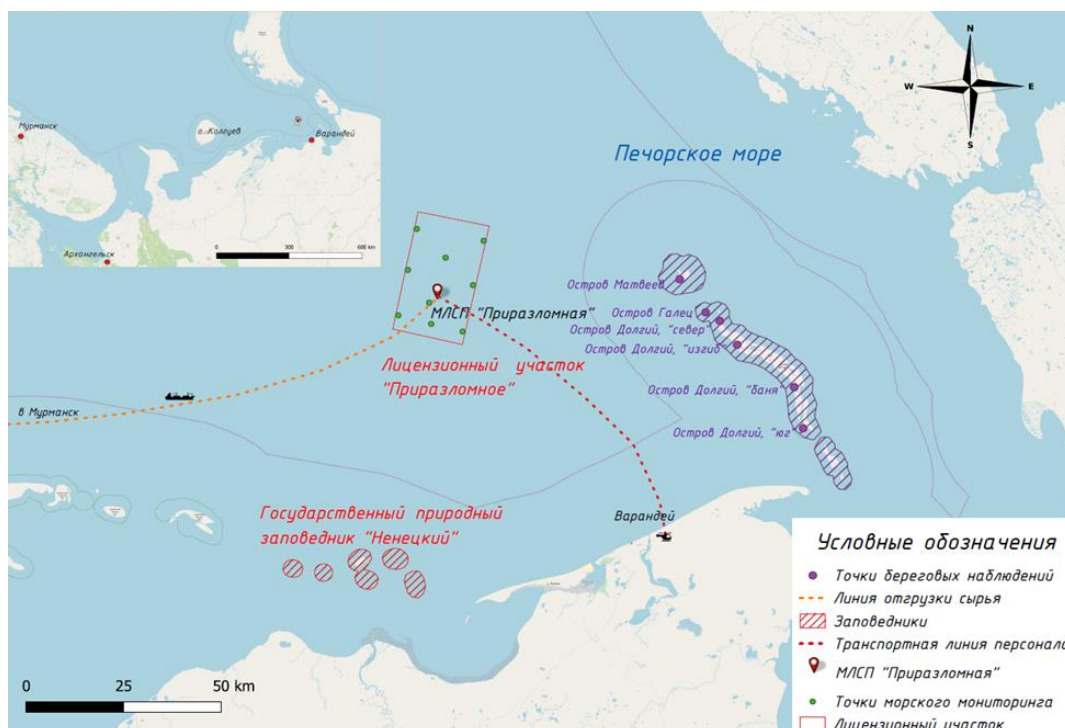


Рисунок 1.1 – Ситуационный план месторождения

Срок его разработки составил 36 лет. Глубина моря в районе месторождения примерно 20 метров. Добыча ведётся со стационарной платформы – морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) «Приразломная».

Платформа создавалась так, чтобы была обеспечена максимальная безопасность. Она сконструирована с учётом всевозможных климатических условий, выдерживает высоту волн в 10 метров. Верхняя часть платформы защищена от воздействия льда и волн специальными дефлекторами, установленными по периметру. Нижняя часть платформы (кессон) состоит из

трёхметровых стен, покрыт четырёх сантиметровым слоем плакированной стали, устойчивой к коррозии и износу. Кессон также является хранилищем добытой нефти. Поток сырья, поступающий в хранилище, вытесняет балластную воду, а при откачке нефти происходит замещение её балластной водой. Данный способ исключает попадание в ёмкости кислорода, что обеспечивает отсутствие свободной зоны для накопления взрывоопасного газа. Использованный буровой раствор и шлам закачиваются в специальную поглощающую скважину, а нефтесодержащая вода, дождевая вода и снег закачиваются обратно в пласт.

Для отгрузки нефти на платформе предусмотрен комплекс устройств прямой отгрузки нефти (КУПОН), который работает на основе крановой системы и позволяет производить загрузку танкеров с платформы. Отгрузка осуществляется через одно из носовых приёмных устройств, при этом соблюдаются максимальные условия безопасности: отгрузка нефти начнётся только при соблюдении 30 необходимых условий. На МЛСП используется автоматизированная система управления и безопасности (АСУБ). Данная система управляет процессами добычи, подготовки, отгрузки и хранения нефти дистанционно и автоматически. Также осуществляет контроль пожарогазовой обстановки и распределения электроэнергии.

Технология добычи нефти на данной платформе отличается от добычи на Мексиканском заливе. Т.к. глубина 20 метров, то платформа стоит непосредственно на дне, следовательно, все её скважины расположены внутри и не контактируют с водой, тем временем как в Мексиканском заливе расстояние между буровой и скважиной может составлять сотни метров и соединяются они сложной промежуточной конструкцией.

Извлекаемые запасы нефти месторождения составляют 72 млн. тонн. Отгрузка первого танкера осуществилась в 2014 г. На мировой рынок впервые поступил новый сорт нефти, добытой на российском арктическом шельфе ARCO (Arctic Oil). В первый год разработки было добыто около 300 тыс. тонн нефти.

### 1.3 Климатические условия региона

Климат Печорского моря определяется его высокоширотным расположением, особенностями атмосферной циркуляции, а также характером прилегающей поверхности – теплых вод Баренцева моря зимой и холодных вод Арктического бассейна летом.

Климат здесь более суров, чем в юго-западной части Баренцева моря. Это связано с меньшим влиянием теплых атлантических течений и наличием ледяной корки 7-8 месяцев в году.

Особенности региона - создание арктических водных толщ на севере моря и морских полярных на юге, существование многочисленных островов, череда теплых и холодных течений, морские льды и зоны на поверхности вод оказывают влияние на синоптические процессы. Солнечная радиация поступает на акваторию неравномерно из-за наличия полярного дня и ночи.

По мере потери тепла от атлантических воздушных масс, среднемесячная температура воздуха в целом уменьшается. Самыми теплыми месяцами в году являются июль и август, а самыми холодными январь и февраль. Средняя температура воздуха в год находится ниже нуля. Температура находится в пределах выше нуля 150 дней в году.

Влажность воздуха почти не изменяется. Колебания по сезонам слабо выражены, значения в среднем по месяцу колеблются в пределах 84-90%.

На юго-востоке Баренцева моря температура воды изменяется больше всего из-за поверхностного горизонта, на котором амплитуда колебаний в течении года составляет в среднем 10°C. Температура морской воды в холодный период меняется в диапазоне от - 1,8°C до 0°C; в весенний – от 0°C до + 4°C; в летний – от +5°C до +8°C и в осенний – от +2°C до +4°C.

Вода прогревается максимально в августе до +15°C, а в некоторых местах Печорской губы и других мелководных заливах – до +22 - 23С.

#### 1.4 Анализ геологических условий района

Месторождение «Приразломное» расположено на Варандей-Адзвинской структурной зоне внутриматериковой Печорской плиты.

Печорская плита находится на окраине Восточно-Европейской платформы, граничит с Предуральским краевым прогибом на востоке и с Баренцевой материковой плитой на западе и северо-западе.

Печорская плита имеет возраст Байкала, и ее осадочный ярус формируется с начала нижнего кембрия. Мощность осадочного яруса возрастает в закономерности от Тиманского мегавала, где он составляет первые сотни метров, до Полярного Урала, где он достигает уже 15 км. В центральной части, в районе месторождения «Приразломное», мощность осадочного яруса составляет 6-8 км.

Месторождение «Приразломное» в морфоструктуре принадлежит валу Сорокина, который в конце позднего плейстоцена испытывает погружение, вследствие чего накапливается мощная толща (около 100 м) осадков позднеплейстоцена.

Новейшие отложения в разрезе представляют собой череду песчано-глинистых осадков морского, аллювиально-морского и ледово-морского генезиса.

Распределение температур водной толщи на дне влияет на температурный режим грунтов, и на мерзлоту сверху. Температура воды в среднем в год на дне в районе месторождения «Приразломное», где глубина моря 20-22 м, составляет от  $+0,5^{\circ}\text{C}$  до  $+1^{\circ}\text{C}$ , следовательно, температура грунтов на дне в среднем не ниже  $+0,5^{\circ}\text{C}$ .

Так как грунты, которые составляют разрез, являются засоленными (минерализация поровых вод составляет 21-45 г/л) и температура их замерзания ниже замеренных (для песков  $-1,4^{\circ}\text{C}$ , для глин  $-2,1^{\circ}\text{C}$ ), можно сделать вывод о широком распространении в районе месторождения «Приразломное» многолетнеохлажденных пород.

Район месторождения «Приразломное» в геологическом отношении представляет собой довольно обширную равнину, слабонаклоненную к северо-востоку, с глубинами моря 20-22 м, и удаленную от побережья на 50-60 км. На площади «Приразломное» грунты на дне представлены, в основном, мелкими песками высотой от 3 до 6 м. Во время весеннего и летнего периода образуются сильные шторма, которые размывают алевритистые осадки.

### **1.5 Сейсмичность региона**

В пределах Юго-восточной части Баренцевоморского региона не обнаружено ощутимых сейсмических явлений или зон, однако эта часть региона находится под влиянием граничащих с ней сейсмогенных зон:

- На западе – район губы «Мезенская», являющийся восточным окончанием Мурман-Финмаркенской сейсмической зоны;
- На северо-востоке – сейсмоактивная зона «Новоземельская» (в районе пролива Маточкин Шар);
- На юге – сейсмоактивная зона хребта Чернышева. За период 1984 - 1986 гг. в Чернышевской сейсмоактивной зоне зарегистрировано 24 землетрясения с магнитудой 3,0-3,4.

Согласно графику землетрясений, для Баренцевоморского региона 5-бальные землетрясения могут ожидаться 1 раз в 100 лет, 6-бальные – 1 раз в 1000 лет.

## **2 Технологическая часть**

### **2.1 Характеристики МЛСП «Приразломная»**

Технологическая система подготовки и утилизации продукции скважин рассчитана на работу с серосодержащим пластовым флюидом и получение товарной нефти.

Добыча нефти предполагается с поддержанием пластового давления (ППД) путем повторной закачки в пласт пластовой воды, дополненной определенным количеством балластной и морской воды.

Добыча нефти осуществляется непрерывно, затем, после подготовки нефть подается в танки-хранилища кессона и периодически отгружается на танкеры. Добытая нефть отправляется на подготовку до уровня качества товарной нефти в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51858-2002 [10].

Способ добычи нефти механизированный с использованием погружных электроцентробежных насосов (ЭЦН).

Устья скважин соединены с общим манифольдом для направления скважинного флюида в замерный или эксплуатационный сепараторы.

Определение производительности каждой отдельно взятой скважины производится через замерный сепаратор.

### **2.2 Сбор и подготовка нефти и газа**

Поднятая из скважины на поверхность газожидкостная смесь за счет установленных в скважине насосов, доставляется на групповые замерные пункты. Они объединяют до 14 скважин и позволяют осуществлять следующие операции:

- Замерять дебит скважины;
- Определять количество воды в жидкости;
- Отделять газ от жидкости и замерять его объем;

- Передавать информацию о дебите отдельно по каждой скважине и суммарное количество добытой жидкости в целом по групповой установке на диспетчерский пункт.

Скважинная газожидкостная смесь (ГЖС) поступает в распределительную батарею групповой установки, рассчитанную на подключение 14 скважин. По заданной программе поочередно каждая из подключаемых скважин специальным вращающимся устройством переключается на замер.

Переключатель представляет собой два вставленных один в другой цилиндра. Наружный цилиндр соединен со всеми скважинами, внутренний цилиндр имеет возможность вращаться автоматически по заданной программе и, вращаясь, он поочередно подставляет имеющееся на его цилиндрической поверхности отверстие к каждому скважинному трубопроводу, подключенному к наружному цилиндру.

Таким образом образуется канал, по которому ГЖС из отдельной скважины поступает в сепаратор.

Из переключателя ГЖС направляется в сепаратор, где происходит отделение газа от жидкости. Отсепарированный газ и жидкость сбрасываются в общий трубопровод.

Нефть добывается вместе с водой в виде эмульсии – смеси, в которой мелко раздробленные капли воды находятся в нефтяной среде во взвешенном состоянии и поэтому не отстаиваются, и не сливаются друг с другом.

Кроме того, на всём пути нефти от забоя до ЦППН происходит интенсивное перемешивание нефтяной смеси, что не способствует разделению нефти и воды. Поэтому, по пути движения в жидкость вводят деэмульгатор, который при нагреве жидкости ускоряет процесс разрушения эмульсии. Для очистки от солей в нефть вводят пресную воду, которая отмывает соли.

На ЦППН добытая нефть поступает на трубчатые печи, в которых она нагревается для лучшего разделения нефти и воды. Этот способ основан на



том, что при нагреве эмульсии её вязкость снижается, и капли воды соединяясь, друг с другом, осаждаются.

С печей нефтяная эмульсия подаётся на установку предварительного сброса воды (УПСВ), где происходит не только обезвоживание, но и дегазация.

### **2.2.1 Газотурбинные генераторы**

Газ, который поступает от сепараторов нефти используется, главным образом на ГТГ, в качестве топлива.

На платформе предусмотрены газотурбинные генераторы (ГТГ), размещенные со всеми вспомогательными системами в теплозвукоизолирующих контейнерах, которые рассчитаны на эксплуатацию ГТГ на открытой палубе.

На выхлопных патрубках трех ГТГ оборудованы блоки утилизации тепла выхлопных газов (котлы-утилизаторы), предназначенные для выработки тепла в составе системы теплоносителя. Система газоотвода главных турбогенераторов обеспечивает отвод выхлопных газов от ГТГ в атмосферу.

Предлагается подключение сверхзвукового сепаратора перед данными установками, для того, чтобы подготавливать газ для ГТУ и отделять углеводороды из ПНГ.

## **2.3 Исследование сверхзвукового сепаратора**

Сверхзвуковой сепаратор представляет собой циклонный сепаратор, в канале которого реализуется сверхзвуковые скорости потока.

За счёт реализации высоких скоростей удаётся понизить температуру газа на 70 °С и более градусов, и тем самым обеспечить условия для конденсации и сепарации тяжёлых фракций, которые находятся в газе.

Сверхзвуковые сепараторы используются в нефтяной и газовой промышленности для извлечения из газа углеводородного конденсата,

пропан-бутановой и этановой фракций, а также водяных паров. Данная технология успешно реализовалась как в России, так и за рубежом.

Сверхзвуковой сепаратор представлен на рисунке 2.1.

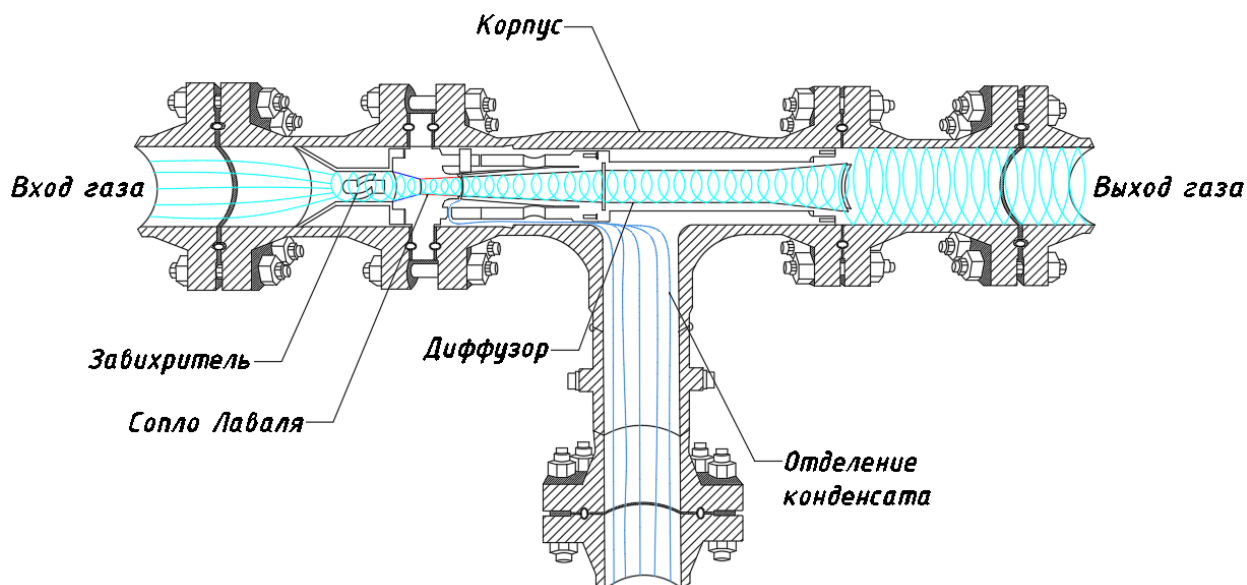


Рисунок 2.1 – Схема сверхзвукового сепаратора

Входной поток газа закручивается в лопатках неподвижного завихрителя, далее ускоряется до сверхзвуковой скорости в сверхзвуковом сопле Лавалья. В потоке происходит сильное охлаждение газа за счёт преобразования потенциальной энергии газа в кинетическую.

Далее охлаждённый поток подаётся в рабочую часть, где происходит конденсация тяжёлых фракций природного газа и воды. Закрученный поток образует центробежную силу, в результате которой капли воды двигаются к стенкам рабочей части.

Далее на выходе образуется центральное ядро потока, очищенное от целевых фракций и пристеночный двухфазный слой, состоящий из воды, газа и жидких углеводородов. Двухфазный слой отделяется от ядра посредством щелевого отбора и направляется в диффузор, в котором происходит торможение потока. Очищенный газ из ядра также затормаживается, поступая в диффузор.

В результате достижения сверхзвуковых скоростей газа могут быть реализованы температуры потока до  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , поэтому сверхзвуковой

сепаратор позволяет реализовать глубокое извлечение целевых компонентов из природного газа.

Низкотемпературная сепарация, основанная на технологии 3S-сепарации, находит применение в установках подготовки природного газа к транспорту в системах, используемых для извлечения углеводородов тяжелее метана. Также данный метод может быть использован для извлечения кислых компонентов из состава углеводородного газа.

На сегодняшний день около трети мировых запасов природного газа имеет высокое содержание кислых компонентов, и эта цифра возрастает по мере истощения запасов газа с низким содержанием кислых компонентов. Данный факт является причиной возрастающего интереса к сверхзвуковой сепарации, как к способу очистки газа от кислых компонентов.

Основными преимуществами 3S-технологии перед остальными процессами низкотемпературной сепарации являются:

- Отсутствие динамических элементов в конструкции аппарата, что обуславливает надежность устройства;
- Простота монтажа и эксплуатации;
- Низкие капитальные и эксплуатационные затраты;
- Сравнительно малые габариты и металлоемкость установки;
- Возможность работы 3S-сепараторов при наличии жидкости во входном потоке газа (что абсолютно неприемлемо для турбодетандеров);
- Более широкий диапазон рабочих параметров и составов сырья по сравнению с турбодетандерными агрегатами;
- Возможность работы устройства без контроля со стороны технологического персонала, а также в подводных добычных комплексах;
- Отсутствие необходимости использования ингибиторов гидратообразования, поскольку время пребывания сырья в 3S-сепараторе при низких температурах составляет сотые доли секунды.

## 2.4 Испытание сверхзвукового сепаратора на месторождении «Заполярье»

В 2009 – 2010 гг. на установке низкотемпературной сепарации УПМТ – 15С УКПГ – 1С Заполярного НГКМ проводились испытания сверхзвукового сепаратора при участии специалистов ООО «Газпром добыча Ямбург» и Центра «Энго» [37].

Установка переработки моторных топлив (УПМТ) Заполярного месторождения содержит в себе блок низкотемпературной сепарации (НТС) и блок фракционирования газа.

Газоконденсатная смесь из скважины поступает в блок НТС, где происходит конденсация тяжёлых углеводородов и воды за счёт охлаждения газа в рекуперативном теплообменнике и дросселирования в клапане Джоуля – Томпсона.

В низкотемпературном сепараторе сконденсировавшаяся жидкость отделяется от газа. Углеводородный конденсат, выделившийся в блоке НТС служит сырьём для установки фракционирования, в котором получают товарный бензин и техническую пропан – бутановую смесь (СПБТ).

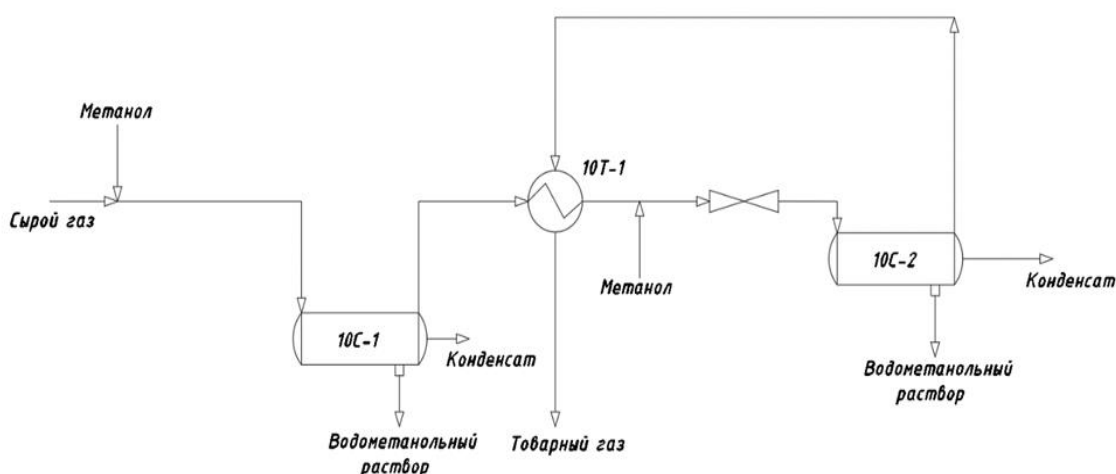


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема НТС УПМТ с дроссельным клапаном

Давление на входе в блок составляет 120 – 125 атм, давление на выходе 75 – 77 атм. Расход газа находится в диапазоне 10000 – 12000 нм<sup>3</sup>/ч. Метанол вводится в элементах установки для предотвращения гидратообразования.

В конце 2009 г. в блоке НТС в байпасе клапана Джоуля – Томпсона был установлен сверхзвуковой сепаратор.

Газ на вход в сверхзвуковой сепаратор подавался сразу после охлаждения в рекуперативном теплообменнике 10Т-1 «газ – газ», двухфазный поток из сверхзвукового сепаратора смешивался с газовой фазой из сепаратора 10С-2 и поступал на нагрев в рекуперативный теплообменник 10Т-1.

Испытания блока НТС со сверхзвуковым сепаратором проводились на различных режимах, отличающихся давлением входного газа, поступающего на вход блока НТС.

Для возможности измерения составов газа в потоках было установлено специальное оборудование, позволяющее отбирать пробы в следующих точках:

- На выходе из сепаратора 10С-1;
- На выходе из 3S – сепаратора (очищенный газ);
- На выходе из блока НТС (товарный газ).

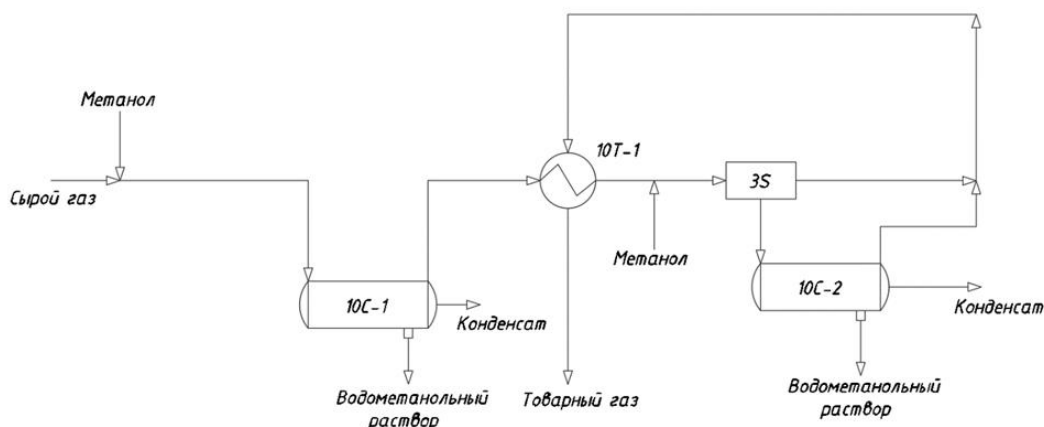


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема НТС УПМТ с 3S – сепаратором

Для сравнения параметров работы УПМТ с дроссельным клапаном и параметров работы УПМТ с 3S – сепаратором были проведены испытания

блока НТС при работе с дроссельным клапаном с давлениями  $P = 11,5$  МПа и  $P = 11,0$  МПа.

Сверхзвуковой сепаратор при испытаниях показал стабильную работу во всём диапазоне давлений входного газа. Давление на входе держалось на уровне  $7,5$  МПа, измеренный уровень статических давлений в сверхзвуковом канале соответствовал расчётному числу Маха  $= 1,2$ .

В ходе испытаний 3S – сепаратор в составе УПМТ позволяет понизить температуру точки росы товарного газа по углеводородам по сравнению с дроссельным клапаном на  $10$  °С. Включение 3S – сепаратора в состав УПМТ позволяет также сократить содержание целевых компонентов  $C_{5+}$  в товарном газе на  $56\%$  при режиме 2.

Установки, базирующиеся на 3S – технологии, имеют ряд преимуществ по сравнению с существующими системами, поэтому могут рассматриваться как один из возможных вариантов УКПГ для морских платформ.

Результаты сравнения занесены в Приложение А.

### 3 Расчётная часть

#### 3.1 Характеристика исходного сырья

В таблицах 3.1 и 3.2 представлен компонентный состав нефти и газа месторождения «Приразломное» соответственно.

Таблица 3.1 – Компонентный состав пластовой нефти месторождения «Приразломное» (мольное содержание, в %):

Компоненты	Пластовая нефть	Товарная нефть
1	2	3
Углекислый газ	0,72	0,0094
Азот	0,38	0,0000
Метан	26,87	0,0217
Этан	5,26	0,4214
Пропан	7,25	3,3220
Изобутан	1,36	1,2270
Норм. бутан	3,66	3,8317
Изопентан	1,34	1,8630
Норм. пентан	2,18	3,1643
Остаток	50,98	86,1380

Таблица 3.2 – Компонентный состав газа по ступеням сепарации месторождения «Приразломное» (мольное содержание, в%):

Компоненты	Газ		
	2	3	4
-	C1	C2	C3
-	t35°C;	t55°C;	t45°C;
Углекислый	2,4337	2,4407	0,9259
Азот+ редкие	0,4007	0,0853	0,0039
Метан	59,8894	32,8544	5,5380
Этан	16,4414	22,1016	17,3707
Пропан	14,8700	28,0460	43,3181
Изобутан	1,4980	3,4865	7,0521

1	2	3	4
Норм. бутан	2,9559	7,1636	15,7438
Изопентан	0,4726	1,2270	3,0908
Норм. пентан	0,6019	1,6088	4,1004
Остаток	0,4366	0,9863	2,8563
Плотность	1,163	1,542	2,085
Газовый	1,58	3,18	9,18
Мол. вес, кг /	26,055	34,543	46,700

### 3.2 Расчёт сверхзвукового сопла Лавалья

Для установки сверхзвукового сепаратора, определим геометрию сверхзвукового сопла Лавалья. Для расчёта зададим следующие исходные данные:

- Давление на входе – 13МПа;
- Давление на выходе – 3МПа;
- Температура торможения – 308 К;
- Плотность газа – 1,214 кг/м<sup>3</sup>;
- Удельная газовая постоянная – 268,6 Дж/кг\*К;
- Массовый расход газа – 2,9 кг/с.

Для определения размеров проведём расчёт основных и промежуточных сечений. По окончании расчётов составим смету и выведем графики распределения параметров потока по длине сопла Лавалья.

- 1) Определяем отношение давлений  $\beta$

$$\beta \frac{P_2}{P_1} \quad (3.1)$$

$$\beta \frac{P_2}{P_1} = \beta \frac{4}{13} = 0,308 < 0,547$$

- 2) Определяем исходную скорость  $C_2$ , м/с

$$C_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right)} \quad (3.2)$$



где  $k$  - показатель адиабаты для сложного газа, согласно ГОСТ 30319.1-2015 [11] определяется по формуле Кобза и равен 1,29;

$R$  – удельная газовая постоянная смеси газа:

$$R = \frac{\bar{R}}{M_{\Gamma}} = \frac{8314,3}{30,95} = 268,6 \text{ Дж / (кмоль} \cdot \text{К)} \quad (3.3)$$

$$\bar{R} = 8314,3 \text{ Дж / (кмоль} \cdot \text{К)}$$

$$C_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{1,29}{1,29-1} \cdot 268,6 \cdot 300 \cdot \left(1 - 0,308^{\frac{1,29-1}{1,29}}\right)} = 407 \text{ м/с}$$

3) Определяем действительную скорость на входе из сопла  $C_2^d$ , м/с

$$C_2^d = \varphi \cdot C_2 \quad (3.4)$$

$$C_2^d = 0,97 \cdot 407 = 395 \text{ м/с}$$

4) Определим скорость истечения в минимальном сечении сопла  $C_{кр}$ , м/с

$$C_{кр} = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left(1 - \beta_{кр}^{\frac{k-1}{k}}\right)} \quad (3.5)$$

$$C_{кр} = \sqrt{2 \cdot \frac{1,29}{1,29-1} \cdot 268,6 \cdot 300 \cdot \left(1 - 0,547^{\frac{1,29-1}{1,29}}\right)} = 300 \text{ м/с}$$

Критическое отношение давлений  $\beta_{кр}$ :

$$\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,547 \quad (3.6)$$

5) Определим действительную скорость в критическом сечении сопла  $C_{кр}^d$ , м/с

$$C_{кр}^d = \varphi \cdot C_{кр} \quad (3.7)$$

$$C_{кр}^d = 0,97 \cdot 300 = 291 \text{ м/с}$$

6) Определяем удельный объём газа во сходящем сечении сопла  $\vartheta_1$ , м<sup>3</sup>/кг

$$\vartheta_1 = \frac{R \cdot T_1}{P_1} \quad (3.8)$$

$$\vartheta_1 = \frac{268,6 \cdot 300}{13000000} = 0,006 \text{ м}^3/\text{кг}$$

7) Определяем удельный объём газа в критическом сечении  $\vartheta_{кр}$ , м<sup>3</sup>/кг

$$\vartheta_{кр} = \vartheta_1 \left( \frac{1}{\beta_{кр}} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (3.9)$$

$$\vartheta_{кр} = 0,006 \left( \frac{1}{0,547} \right)^{\frac{1}{1,29}} = 0,009 \text{ м}^3/\text{кг}$$

8) Определяем удельный объём газа в выходном сечении  $\vartheta_2$ , м<sup>3</sup>/кг

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (3.10)$$

$$\vartheta_2 = 0,006 \left( \frac{13000000}{4000000} \right)^{\frac{1}{1,29}} = 0,015 \text{ м}^3/\text{кг}$$

9) Теоретическая температура газа в минимальном сечении сопла при изоэнтропийном течении  $T_{кр}$ , К

$$T_{кр} = \frac{P_{кр} \cdot \vartheta_{кр}}{R} \quad (3.11)$$

$$T_{кр} = \frac{13000000 \cdot 0,547 \cdot 0,009}{268,6} = 238 \text{ К}$$

10) Теоретическая температура газа в выходном сечении сопла при изоэнтропийном течении  $T_2$ , К

$$T_2 = \frac{P_2 \cdot \vartheta_2}{R} \quad (3.12)$$

$$T_2 = \frac{4000000 \cdot 0,015}{268,6} = 223 \text{ К}$$

11) Потери кинетической энергии в струе газа в минимальном сечении  $\Delta h_{C_{кр}}$ , Дж/кг

$$\Delta h_{C_{кр}} = (1 - \varphi^2) \cdot \frac{C_{кр}^2}{2} \quad (3.13)$$

$$\Delta h_{C_{кр}} = (1 - 0,97^2) \cdot \frac{300^2}{2} \cdot 10^{-3} = 2,6 \text{ Дж/кг}$$

12) Потери кинетической энергии в струе газа в выходном сечении  $\Delta h_{C_2}$ , Дж/кг

$$\Delta h_{C_2} = (1 - \varphi^2) \cdot \frac{C_2^2}{2} \quad (3.14)$$

$$\Delta h_{C_2} = (1 - 0,97^2) \cdot \frac{407^2}{2} \cdot 10^{-3} = 4,9 \text{ Дж/кг}$$

13) Действительная температура в критическом сечении  $T_{кр}^d$ , К

$$T_{кр}^d = T_{кр} + \frac{\Delta h_{C_{кр}}}{C_p} \quad (3.15)$$

$$T_{кр}^d = 238 + \frac{2,6}{0,9} = 240 \text{ К}$$

- 14) Действительная температура в выходном сечении  $T_2^d$ , К

$$T_2^d = T_{кр} + \frac{\Delta h_{C_2}}{C_p} \quad (3.16)$$

$$T_2^d = 238 + \frac{4,9}{0,9} = 243 \text{ К}$$

- 15) Действительный удельный объём в критическом сечении  $\vartheta_{кр}^d$ , м<sup>3</sup>/кг

$$\vartheta_{кр}^d = \frac{R \cdot T_{кр}^d}{P_{кр}} \quad (3.17)$$

$$\vartheta_{кр}^d = \frac{268,6 \cdot 240}{0,547 \cdot 13000000} = 0,009 \text{ м}^3/\text{кг}$$

- 16) Действительный удельный объём в выходном сечении  $\vartheta_2^d$ , м<sup>3</sup>/кг

$$\vartheta_2^d = \frac{R \cdot T_2^d}{P_2} \quad (3.18)$$

$$\vartheta_2^d = \frac{268,6 \cdot 243}{4000000} = 0,016 \text{ м}^3/\text{кг}$$

- 17) Минимальное сечение сопла  $F_{min}$ , м<sup>2</sup>

$$F_{min} = \frac{G \cdot \vartheta_{кр}^d}{C_{кр}^d} \quad (3.19)$$

$$F_{min} = \frac{2,4 \cdot 0,009}{291} = 0,000074 \text{ м}^2$$

- 18) Максимальное сечение сопла  $F_{max}$ , м<sup>2</sup>

$$F_{max} = \frac{G \cdot \vartheta_2^d}{C_2^d} \quad (3.20)$$

$$F_{max} = \frac{2,4 \cdot 0,016}{395} = 0,000097 \text{ м}^2$$

- 19) Определение минимального размера сечения  $D_{min}$ , м

$$D_{min} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{min}}{\pi}} \quad (3.21)$$

$$D_{min} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,000074}{3,14}} = 0,0097 \text{ м}$$

- 20) Определение максимального размера сечения  $D_{max}$ , м

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\max}}{\pi}} \quad (3.22)$$

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,000097}{3,14}} = 0,011 \text{ м}$$

Таблица 3.3 – Смета параметров газа в сопле Лавалья

Сеч.	w, м/с	a, м/с	T, К	P, Па	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	M	q	l, мм	d, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1-1	-3,49	396,55	308,14	12998417,51	157,05	-0,01	0,30	0,00	0,010
3-3	107,64	389,93	297,93	11553067,43	144,37	0,28	0,50	0,02	0,008
Кр.	329,33	329,33	212,52	5933044,01	103,94	1,00	1,00	0,03	0,005
4-4	506,06	204,98	82,33	128145,04	5,79	2,47	0,66	0,08	0,007
2-2	518,48	190,50	71,11	3000000,00	157,06	2,72	0,47	0,13	0,008

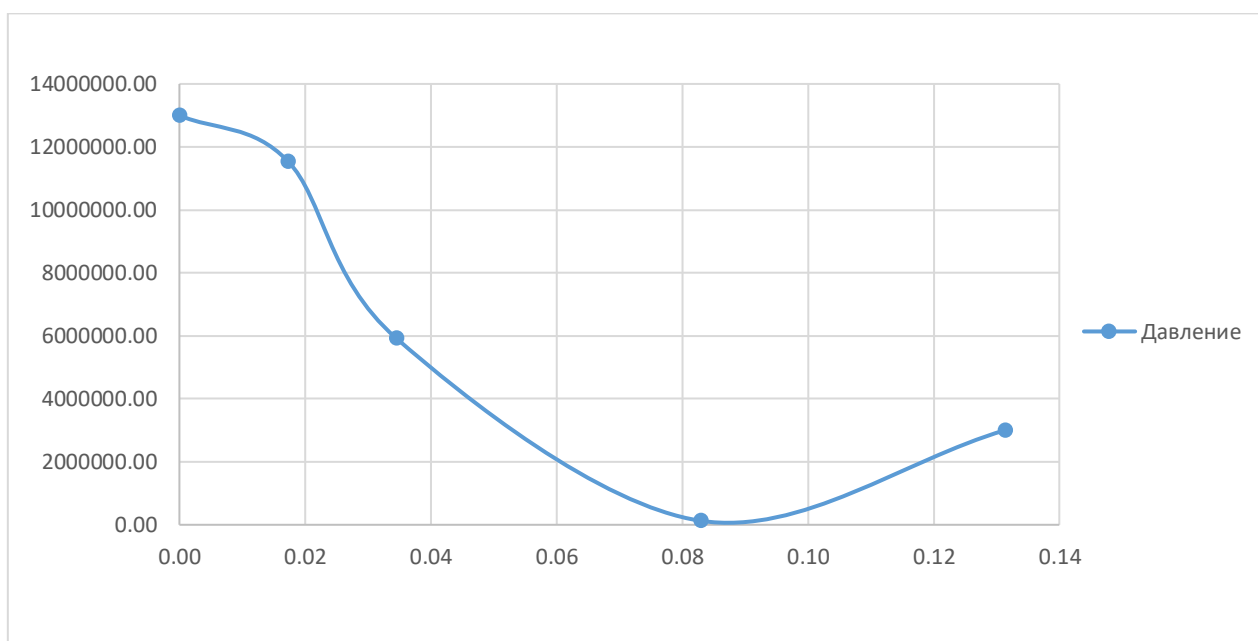


Рисунок 3.1 – График распределения давления в сопле Лавалья

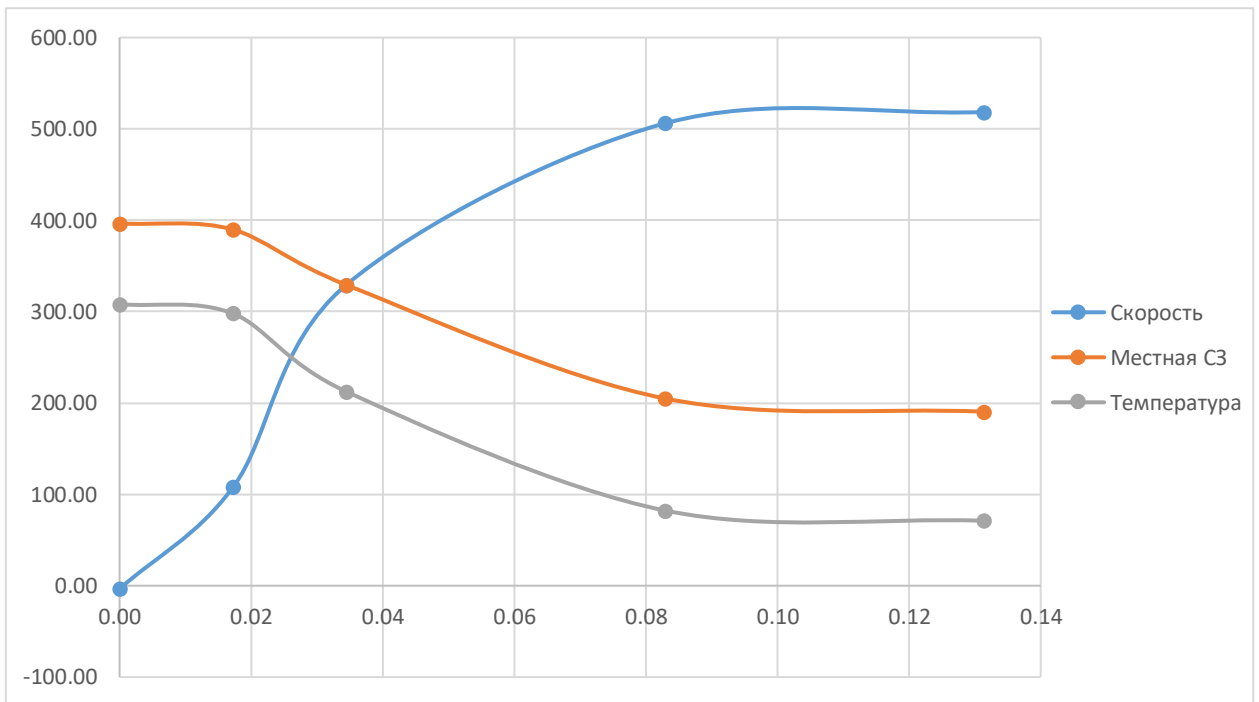


Рисунок 3.2 – График распределения скорости и температуры в сопле Лавая

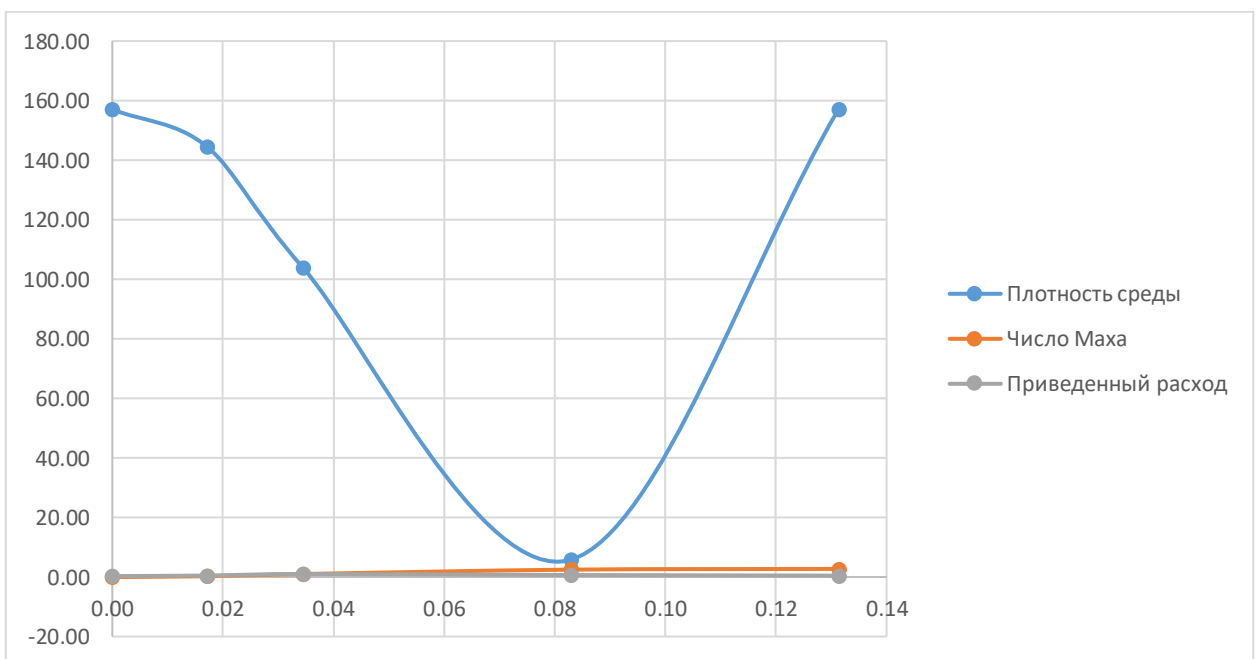


Рисунок 3.3 – График распределения плотности, расхода и числа Маха в сопле Лавая

### 3.3 Моделирование процесса сверхзвуковой сепарации в ПО Unisim Design

В среде моделирования Unisim Design проведём симуляцию процесса в сверхзвуковом сепараторе. Рабочая среда моделирования включает в себя необходимые для решения поставленной задачи составные компоненты сырья, технологическое оборудование, материальные и энергетические потоки.

Для моделирования устройства 3S – сепаратора стандартными средствами Unisim Design нужно воспроизвести 3 физических процесса, которые протекают в аппарате:

- Расширение входного потока газа и его охлаждение;
- Сепарация сконденсированного газожидкостного потока на газовый и газожидкостный потоки;
- Компримирование разделённого газового потока.

Исходные данные газового потока:

- Температура – 300 К
- Давление на входе – 13 МПа
- Давление на выходе – 3 МПа
- Расход газа – 2,4 м<sup>3</sup>/с

Схематически процесс можно описать следующим образом: Поток сырья поступает во входное устройство, затем в сопле Лаваля происходит расширение и конденсация. Затем в диффузоре происходит сепарация и компрессия потока. Схема процесса представлена на рисунке 3.4.

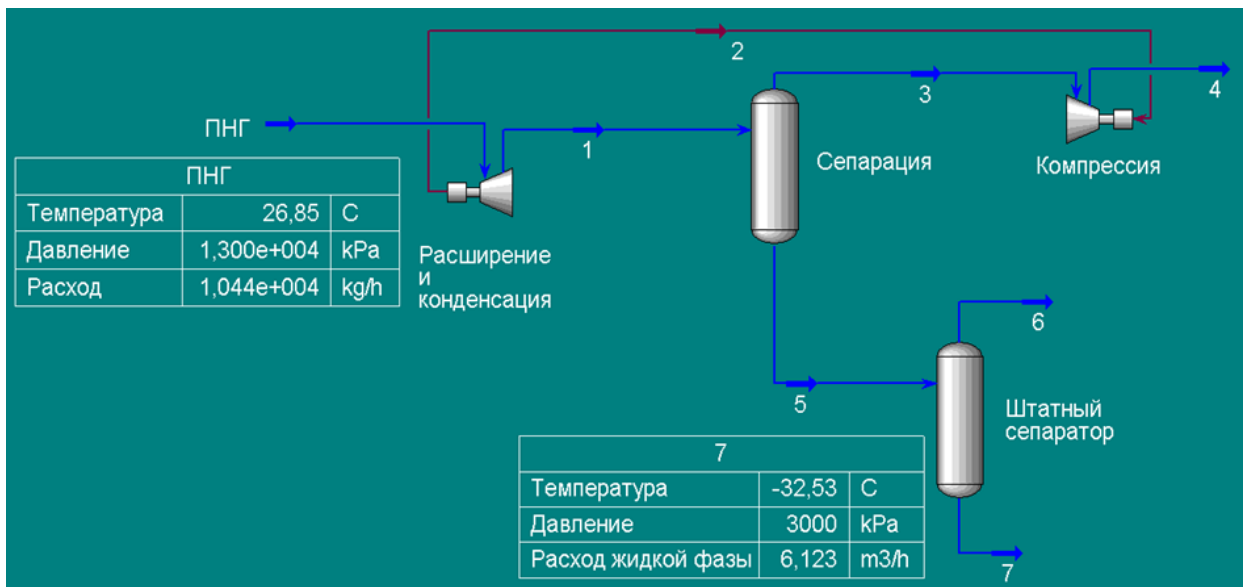


Рисунок 3.4 – Схема процесса сверхзвуковой сепарации

Газовый поток, полученный в результате сепарации отправляется на ГТУ, а для жидкой фазы предусматривается еще один сепаратор, но уже штатный. Жидкая фаза, полученная в результате работы штатного сепаратора, подаётся в нефтехранилище, а газ на факельную установку.

Жидкая фаза имеет расход 6 м3/ч, т.е. примерно 40000 т/год, что является огромным плюсом для платформы.

## 4 Научная глава

### 4.1 Исследование комбинированного сверхзвукового сепаратора

Сепарация водяного пара и CO<sub>2</sub> является важной процедурой при переработке природного газа, особенно на морских месторождениях и плавучих системах для добычи, хранения и отгрузки нефти. В связи с этим большую популярность приобрела технология сверхзвуковой сепарации.

В научной работе Власенко В.С. [31] был представлен альтернативный вариант сверхзвукового сепаратора - КСС. Принцип работы КСС основан на совмещении технологии сверхзвуковой сепарации с эффектом Ранка–Хилша (Рисунок 4.1).

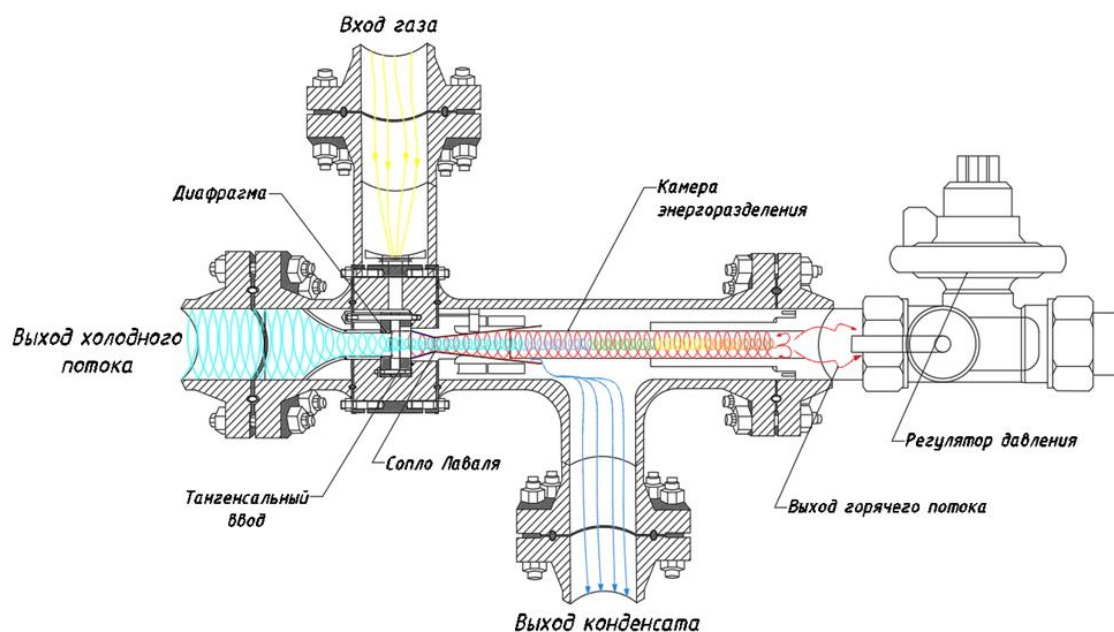


Рисунок 4.1 – Схема комбинированного сверхзвукового сепаратора

Газожидкостный поток закручивается в вихревой трубе при помощи тангенциального закручивающего устройства.

В камере энергетического разделения находится узел в виде сопла Лавая, который разгоняет газовый поток до сверхзвуковых скоростей. Сбор конденсата осуществляется также, как в 3S – сепараторе через зазор в диффузорной части камеры разделения.



Схема обработки газа с использованием двух комбинированных сверхзвуковых сепараторов позволит повысить эффективность подготовки газа на платформе и его очистку от воды и различных примесей (Рисунок 4.2).

Принцип работы следующий: сырой газ нагнетается компрессором 1, поступает через теплообменник 1 и газовый сепаратор 1 на вход в КСС, под действием эффекта Ранка-Хилша образуется холод и формируется конденсат тяжёлых углеводородных компонентов.

Затем холодный и горячий потоки смешиваются и направляются через сепаратор 2 на теплообменник 1 для охлаждения входящего потока. На компрессор 2 подаётся подготовленный сухой газ. Отобранный в сепараторах конденсат также используют для дополнительного охлаждения входящего потока и направляют на теплообменник 2.

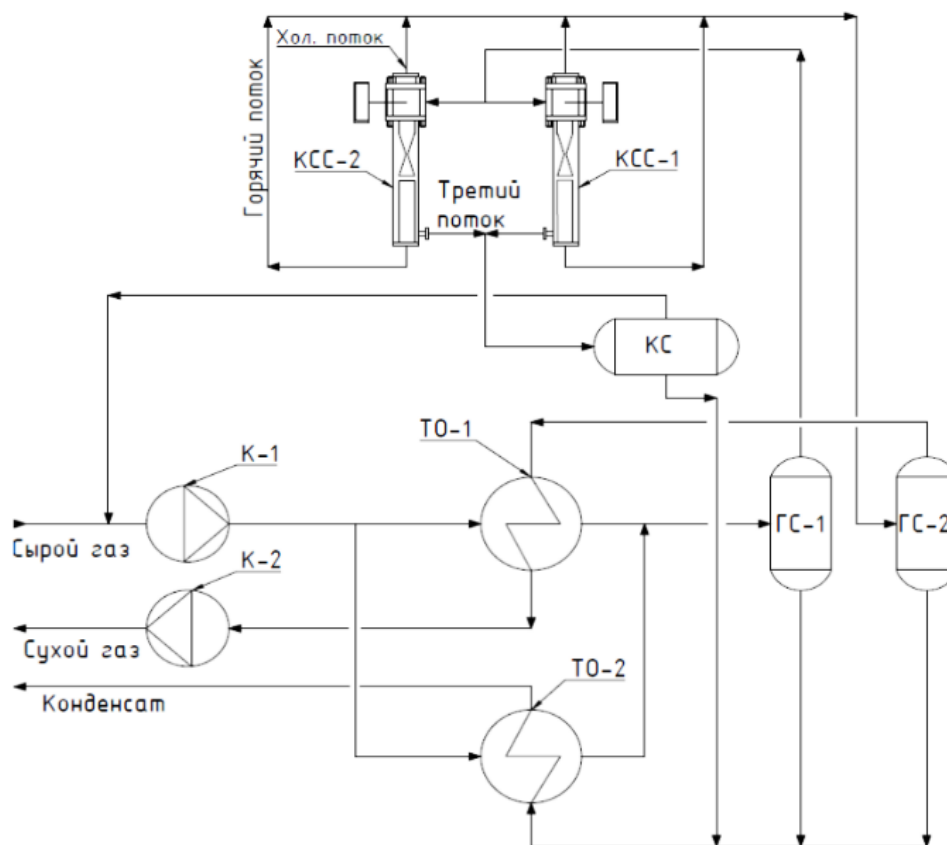


Рисунок 4.2 – Технологическая схема очистки и осушки газа:

К – компрессор, ТО – теплообменник, ГС – газовый сепаратор, КСС – комбинированный сверхзвуковой сепаратор.

Группой учёных ДВФУ были проделаны эксперименты на влажном воздухе, результат которых показал эффективность КСС в сравнении с трёхпоточной вихревой трубой.

Таким образом, использование КСС в системе НТС на плавучих платформах позволит не только снизить габаритные размеры установок, но и повысить эффективность теплообменных процессов при неизменном качестве сепарации.

#### 4.2 Расчёт сопла Лавалья комбинированного сверхзвукового сепаратора

В КСС сопло Лавалья располагается между закручивающим устройством и камерой разделения. Примем расчётное сопло Лавалья сверхзвукового сепаратора.

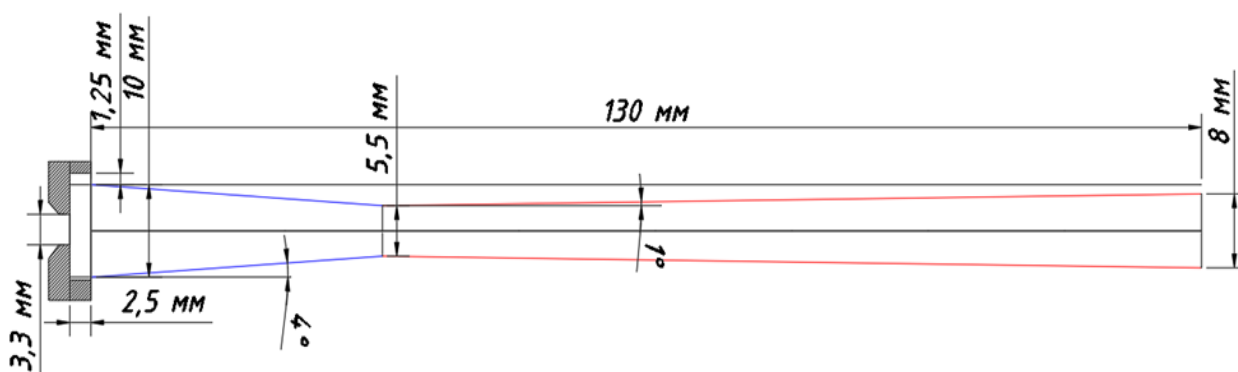


Рисунок 4.3 – Схема сопла комбинированного сверхзвукового сепаратора

Определяем площадь сопловых каналов. Согласно методике [36] диаметр камеры энергоразделения принимаем за диаметр входного сечения сопла.

Рассчитаем сепарационный зазор в радиальном направлении:

$$h = 0,05 \cdot D_{\text{тр}} = 0,275 \text{ мм} \quad (4.1)$$

Далее определяем параметры прямоугольного спирального сопла. Определяем ширину  $b$  и высоту прямоугольного канала в выходном сечении  $h$ . Примем высоту равную 1,25 мм, следовательно, по соотношению  $b:h = 2:1$ , ширина  $b$  будет равна 2,5 мм.

Далее находим диаметр диафрагмы, равный:

$$d_d = 0,6 \cdot d_{кр} = 3,3 \text{ мм} \quad (4.2)$$

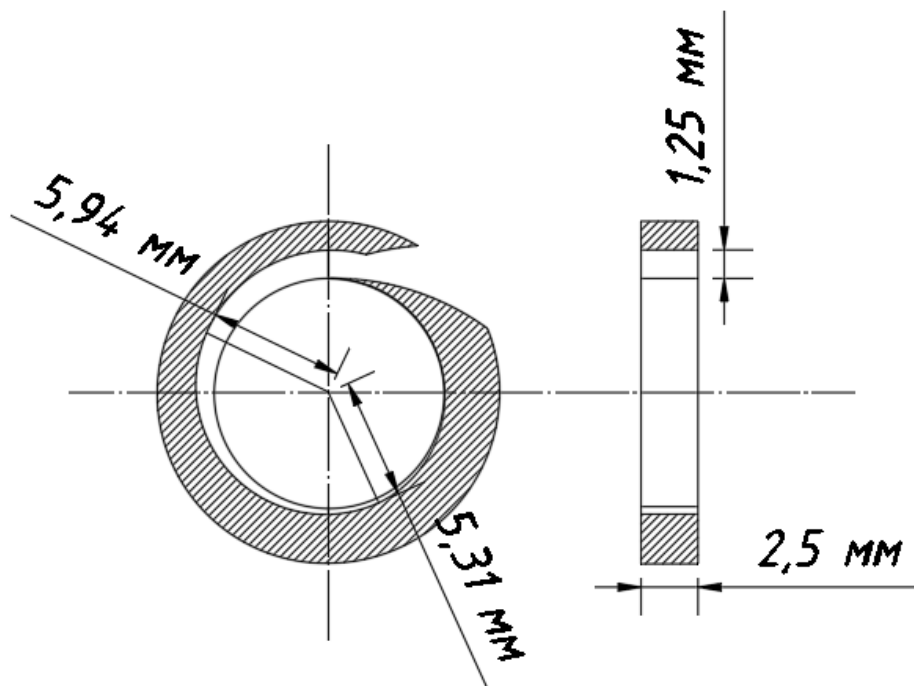


Рисунок 4.4 – Схема прямоугольного спирального сопла

Далее определяем длину камеры энергоразделения. Для труб с диаметром  $10 \text{ мм} \leq d_{тр} \leq 40 \text{ мм}$  длину камеры энергоразделения принято брать:

$$L = 9 \cdot d_{тр} = 90 \text{ мм} \quad (4.3)$$

## **5 Промышленная и экологическая безопасность**

### **5.1 Охрана труда и техника безопасности**

Рабочий персонал МЛСП «Приразломная» должен гарантировать нормальное функционирование скважин, а также АГЗУ путем:

- Обслуживания и своевременного ремонта оборудования, установок, приборов и т.д.;
- Обеспечивать очистку подъемных труб, отводов и парафиновых коллекторов и т.д.

Во избежание несчастных случаев при обслуживании и ремонте оборудования персонал обязан иметь соответствующую подготовку, пройти производственный инструктаж, ознакомиться с правилами техники безопасности, а также знать методы оказания первой медицинской помощи. Инструктаж должен соответствовать требованиям ГОСТ 12.0.004-2015 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Организация обучения безопасности труда. Общие положения».

Принимаемые на должность обслуживающего персонала сотрудники по окончании инструктажа должны сдать экзамен по технике безопасности и получить удостоверение с присваиваемой квалификационной группой в соответствии с постановлением министерства труда и социального развития РФ от 13.01.2003 № 1/29 «Об утверждении порядка обучения по охране труда и проверки знаний требований охраны труда работников организаций» (ред. от 30.11.2016).

Рабочий персонал МЛСП «Приразломная» обязан знать схемы его коммуникаций, чтобы в случае аварии или пожара в кратчайшие сроки безошибочно выполнять необходимые действия.

Операторы МЛСП обязаны каждые 6 месяцев работы проходить инструктаж по безопасному ведению работ и не более одного раза в год – проверку знаний.

Внеочередную проверку знаний правил и инструкций по охране труда оператор должен пройти:

- При изменении технологического прогресса, внедрении нового оборудования и механизмов;
- При введении в действие новых правил и норм безопасности, инструкций по безопасному ведению работ;
- В случае нахождения нарушений требований правил безопасности и инструкций, которые могли привести или привели к травме или аварии (по усмотрению начальника цеха);
- По поручению или указанию руководителя предприятия, по направлению вышестоящих органов;
- По распоряжению органов госнадзора в случае возникновения неполноценных знаний;
- Во время перевода на другую работу или перерыва в работе более чем на 6 месяцев.

При выполнении работ на пожароопасных и взрывоопасных объектах оператор обязан использовать инструмент из цветных металлов, покрытое медью или хорошо смазанным солидолом или другой консистентной смазкой.

Запрещено открытое пламя или курение вблизи скважин, насосных и других взрывоопасных и пожарных сооружений. Курить разрешается только в специально отведенных и оборудованных местах. Работы на неисправном оборудовании и механизмах, а также использование неисправных инструментов, для ремонта и ненадлежащего защитного оборудования запрещены.

Санитарно-гигиенические требования к воздуху на МЛСП «Приразломная» должны соответствовать ГОСТ 12.1.005-88 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» (актуализация 06.04.2015).

### 5.1.1 Правила пожарной безопасности

МЛСП «Приразломная» относится к объектам, подверженным риску взрыва и возгорания. В настоящее время вода остается наиболее распространенным средством пожаротушения.

Для тушения пожара была предусмотрена система пожарного водоснабжения.

В мерах пожарной безопасности на площадках вокруг скважин должны поддерживаться порядок и чистота. В случаях разлива нефти обязательно необходимо очистить площадку от нефти, а затем засыпать песком.

На замерных установках должны быть размещены ящики с песком, щит с лопатами, ломы, ведрами и огнетушителями ОХП-10, ОУ-2, ОУ-5.

Для тушения пожара в качестве средств пожаротушения используют воду в виде пара или в распыленном виде, инертные газы, пены, порошки. Для тушения оборудования, находящегося под напряжением, используют углекислоту.

В соответствии с ГОСТ 12.0.004-2015 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Организация обучения безопасности труда. Общие положения» техническими методами и средствами защиты для обеспечения электробезопасности являются: защитное заземление, изоляция токопроводящих элементов, ограждение, сигнализация, индивидуальные средства защиты, защитные устройства и т.д.

Для защиты нефтепромыслового оборудования используют стержневые молниеотводы класса I с громоотводом.

Ингибиторы солеотложения, кислотные составы невзрывоопасны, не горючи.

Противопожарный режим устанавливается инструкциями, согласованными с органами пожарного надзора.

## 5.2 Мероприятия по охране окружающей среды

### 5.2.1 Охрана атмосферного воздуха

Основными мерами по защите атмосферного воздуха на МЛСП являются соблюдение стандартов качества воздуха рабочей зоны и ограничения вредных выбросов в атмосферу до нормативного уровня от всех источников загрязнения на всех этапах работы.

Технические и технологические решения, принятые в проекте МЛСП «Приразломная» включают:

- Использование попутного нефтяного газа для обеспечения собственных нужд;
- Установку дыхательных клапанов и клапанов предохранителей, установку систем рекуперации паров, а также систем сбора неорганизованных выбросов;
- Установку патрубков для выброса двигателей и печей выше уровня верхней палубы;
- Использование дизельного топлива с низким содержанием серы;
- Эксплуатацию газотурбинных генераторов и топливных газов, прошедших предварительную подготовку;
- Применение факельных систем и бессажевого режима сжигания;
- Герметизация неактивных скважин и контроль их технического состояния;

Технический надзор за предотвращением загрязнения воздуха с судов ведется в соответствии с «Руководством по техническому надзору за предотвращением загрязнения воздуха с судов» - документ Российского морского регистра судоходства.

В соответствии с законом РФ «от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей природной среды» (ред. от 30.11.2016) выбросы загрязняющих веществ в атмосферу допускаются на основе разрешения на выброс,

выдаваемого региональными органами по охране природы, на основании утвержденных норм предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

- Плата за загрязнение окружающей природной среды взимается в соответствии с законом Российской Федерации от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей природной среды» (ред. от 30.11.2016).

### **5.2.2 Мероприятия по охране гидросферы**

Так как МЛСП находится в непосредственном контакте с водной средой, необходимо обеспечить минимизацию выбросов в море загрязнённых сточных вод. Большое внимание при проектировании объекта было уделено вопросу обработки и утилизации образующихся в процессе эксплуатации МЛСП стоков. Разработанные технологические схемы практически полностью исключают сброс за борт производственных стоков, образующихся на этапе бурения скважин, а также нефтесодержащих стоков, образующихся в процессе обработки пластовой продукции и эксплуатации комплекса.

Для минимизации воздействия на морскую среду закачке в подземные горизонты подлежат:

- Все объемы отработанных буровых растворов, буровых сточных вод и бурового шлама в поглощающий горизонт;
- Пластовые воды и все нефтесодержащие стоки с опасных и безопасных площадок платформы в систему ППД.

Платформа оборудуется необходимыми системами и резервуарами для сбора, обработки и временного хранения стоков до их закачки в пласт.

Для максимальной очистки санитарных стоков на МЛСП предусматривается устройство установки электрохимической очистки, а также блока доочистки, позволяющих снизить наличие и концентрации присутствующих в стоке до минимально возможных показателей.

На МЛСП предусмотрены системы сбора, накопления и очистки всех категорий образующихся стоков, в том числе дренажные системы опасных и



безопасных стоков, предотвращая тем самым их попадание в море. Все системы оборудованы датчиками для контроля за их переполнением и автоматизированными системами сигнализации.

Не допускается сброс с платформы твердых бытовых и производственных отходов и мусора.

Герметизированные системы добычи, сбора, подготовки и транспорта продукции скважин на платформе оснащаются системами автоматического отключения и блокировок на случаи нарушения технологии или аварий, а также автоматической системы предупреждения перелива токсичных жидкостей в технологических емкостях.

Мероприятия, обеспечивающие рациональное использование и охрану морских вод от загрязнения и истощения сводятся к следующему:

- Все суда, участвующие в проведении работ (суда снабжения) подлежат нормативным проверкам на соответствие требованиям до выдачи им разрешения на осуществление работ, также они должны иметь необходимые сертификаты и разрешение на ведение работ;
- Использование на судах установок очистки хозяйственно-бытовых сточных вод, нефтесодержащих стоков или накопительных емкостей, соответствующих требованиям Российского морского регистра судоходства и сертифицированных соответствующими службами;
- Контроль за сбросом сточных вод и удалением мусора за борт на судах;
- Оптимальный режим водозабора и использования морских вод;
- Оборудование водозаборных сооружений рыбозащитными устройствами;
- Исключение сбросов в море неочищенных или недостаточно очищенных стоков;
- Наличие на каждое загрязняющее вещество очищенных сточных вод, предназначенных для сброса в морскую среду при эксплуатационном

бурении, эколого-рыбохозяйственных и санитарно-эпидемиологических нормативов ПДК [15], разработанных по существующим стандартным методикам и утвержденных в установленном порядке;

- Наличие системы контроля температурного режима сбрасываемых вод;
- Исключение сбросов в море отработанных буровых растворов и шлама, неочищенных или недостаточно очищенных стоков. В соответствии с требованиями Морского регистра судоходства за борт могут сливаться только пожарная вода от системы объемного затопления, бытовые сточные воды после их обработки (очистки);
- Устройство систем, емкостей, контейнеров для сбора всех видов загрязненных стоков и жидких отходов, с их последующей утилизацией или очисткой;
- Использование на платформе установки обработки сточных вод морского исполнения, отвечающей нормам, правилам, изложенным в нормативах по контролю загрязнения водных объектов РМРС [16];
- Работа системы приготовления и сепарации буровых растворов в замкнутом цикле, что позволяет снизить объемы морской воды, необходимой для приготовления растворов;
- Установку специальных поддонов в местах возможных утечек и проливов горюче-смазочных материалов, буровых, тампонажных и других растворов;
- Контроль качества шламодержащих и жидких стоков, закачиваемых в поглощающую скважину;

### **5.2.3 Мероприятия по охране недр**

МЛСП «Приразломная» производит бурение скважин с момента запуска проекта. В целях предотвращения и минимизации негативного воздействия на

недра в процессе бурения скважин проектной технологией бурения и применяемым внутрискважинным оборудованием обеспечивается:

- Изоляция в пробуренных скважинах нефтеносных, газоносных и водоносных пластов по всему вскрытому разрезу;
- Герметичность технических и обсадных колонн труб, спущенных в скважину, их качественное цементирование;
- Предотвращение ухудшения коллекторных свойств продуктивных пластов, сохранение их естественного состояния при вскрытии, креплении, освоении.

В целях предотвращения неконтролируемых выбросов, обвалов стенок скважин и межпластовых перетоков, нефтегазопроявлений и открытых фонтанов проектом на строительство скважин предусмотрено использование специального оборудования и контрольно-измерительных приборов:

- Комплекта противовыбросового оборудования, монтируемого на устье скважины; регулирующих клапанов системы промывки под давлением;
- Контрольно-измерительных приборов, обеспечивающих постоянный контроль за ходом бурения и эксплуатации скважин.

Противовыбросовое оборудование предназначается для герметизации устья скважины и воздействия на пласт при нефтегазоводопроявлениях с целью предотвращения выброса флюида. Комплект геофизического оборудования предназначен для исследований и систематических измерений по контролю бурения и эксплуатации скважин.

Кроме перечисленных видов оборудования, в буровой модуль входит технологическое оборудование, которое одновременно обеспечивает природоохранные функции, в том числе:

- Циркуляционная система бурового раствора;
- Система пневмотранспорта для хранения и транспортирования порошкообразных материалов;

- Противовыбросовое оборудование (система превенторов и манифольд);
- Газосепаратор (для удаления газа из бурового раствора на выходе его из скважины);
- Комплект геофизического оборудования;
- Станция геолого-технологического контроля; лаборатория буровых растворов и грунтов.

Тампонажные растворы предусмотрено готовить с использованием портландцемента, который позволяет получить камень высокой плотности и малой пористости.

## **6 Экономическая часть**

Основной целью расчёта является определение экономической эффективности сверхзвукового сепаратора.

В настоящее время на мировом рынке наблюдается постоянный рост цен на нефтепродукты, в связи с этим особо перспективно выглядит инвестирование средств в приобретении данного аппарата для подготовки углеводородов на продажу. Опыт передовых стран показывает, что использование данного аппарата создаёт ощутимые экономические выгоды.

В работе предусматривается внедрение сверхзвукового сепаратора, для извлечения углеводородов и дальнейшей их продажи. Так же аппарат способствует сепарированию вредных примесей, которые при сжигании в газотурбинных установках пагубно влияют на окружающую среду.

### **6.1 Расчёт основных экономических показателей сверхзвукового сепаратора**

Капитальные затраты в создании любого проекта представляют собой сумму затрат на приобретение и транспортировку оборудования, прочих затрат, связанных с кадрами и другими работами.

Точная стоимость сверхзвукового аппарата не разглашается, но производитель сообщает, что цена превосходит цену вихревой трубы в 10 раз.

Поэтому для того, чтобы определить стоимость 3S – сепаратора берём стоимость трёхпоточной вихревой трубы месторождения «Комсомольское». На 2009 год стоимость её изготовления составляла 1,9 млн. рублей.

Т.к. курс доллара на тот момент был в размере 30 руб., то в 2020 году мы сможем заказать данную установку уже за 4430000 руб. Умножаем в 10 раз и получаем стоимость сверхзвукового сепаратора в размере 44300000 руб.

Но т.к. сверхзвуковой сепаратор требует подключение штатного сепаратора, прибавим и его стоимость в размере 600000 руб.

Таблица 6.1 – Капитальные затраты сверхзвукового сепаратора:

Стоимость оборудования	44500000 р.
Стоимость монтажа и транспортировки на платформу	180000000р.
Итого	225000000р.

## 6.2 Затраты на оплату труда

Т.к. стоимость оборудования была взята на основе контракта на покупку, поставку и установку оборудования, то раздел оплаты труда строителям исключаем. Для бесперебойной работы аппарата необходим персонал:

Таблица 6.2 – Распределение месячной заработной платы:

№ п/п	Должность	Количество	Зарплата в месяц
1	Оператор 3S - сепаратора	1	125 000р.
2	Специалист 3S - сепаратора	1	100 000р.
Итого			225 000р.

Для определения объёма годового фонда оплаты труда умножаем на 12:

$$Z_{зп} = 12 \cdot 225\,000 = 2\,700\,000 \text{ руб. в год} \quad (6.1)$$

Определяем сумму отчислений во внебюджетные фонды:

$$Z_{вф} = Z_{зп} \cdot \sum C_{вф} \quad (6.2)$$

где  $\sum C_{вф}$  – сумма ставок отчисления во внебюджетные фонды.

На 1.01.2017 г. утверждены следующие ставки во внебюджетные фонды [26]:

- Пенсионный фонд – 22%;
- Фонд социального страхования – 2,9%;
- Фонд обязательного медицинского страхования – 5,1%;
- Фонд обязательного социального страхования – 0,4%.

$$З_{\text{вф}} = 2\,700\,000 \cdot \frac{(22 + 2,9 + 5,1 + 0,4)}{100} = 820\,800 \text{ руб. в год}$$

### 6.3 Амортизационные отчисления

Срок эксплуатации аппарата определяем, как время работы до отказа. Это время составляет 15 лет.

Норма амортизации  $K_a$  определяется по формуле [26]:

$$K_a = \frac{100}{T} \quad (6.3)$$

где  $T$  – срок эксплуатации объекта.

$$K_a = \frac{100}{15} = 6,6\%$$

Амортизационные отчисления определяются по формуле [35]:

$$A = K_a \cdot K, \quad (6.4)$$

где  $K$  – капитальные вложения в проект.

$$A = 0,066 \cdot 225\,000\,000 = 14\,850\,000 \text{ руб. в год.}$$

### 6.4 Затраты на текущий ремонт

Затраты на текущий ремонт определим, как 30% от величины амортизации:

$$T_p = 0,30 \cdot A \quad (6.5)$$

$$T_p = 0,30 \cdot 14\,850\,000 = 4\,455\,000 \text{ руб. в год}$$

### 6.5 Прочие затраты

Прочие затраты включают в себя траты на организацию работы банков, трансфер специалистов и тому подобное. Примем, как 15% от всех эксплуатационных:

$$З_{\text{пр}} = 0,15 \cdot (A + T_p) \quad (6.6)$$

$$З_{\text{пр}} = 0,15 \cdot (14\,850\,000 + 4\,455\,000) = 2\,895\,750 \text{ руб. в год.}$$

Таким образом общая сумма затрат на обслуживание аппарата составляет:

$$Z_B = Z_{3П} + Z_{ВФ} + A + T_P + Z_{пр} \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} Z_B &= 2\,700\,000 + 820\,800 + 14\,850\,000 + 4\,455\,000 + 2\,895\,750 \\ &= 25\,721\,550 \text{ руб. в год.} \end{aligned}$$

## 6.6 Экономическая эффективность

Моделирование в Unisim Design показало, что из штатного сепаратора мы получаем 40 000 тонн нефти в год. Если продажа будет осуществляться по оптовой цене 18 000 за тонну, то мы получим выручку 720 млн. руб/год.

Если вычесть из этой суммы годовые затраты на обслуживание, то получим следующую чистую прибыль:

$$П_ч = 720\,000\,000 - 25721550 = 694\,278\,450 \text{ руб. в год.} \quad (6.8)$$

## 6.7 Чистый дисконтированный доход проекта

Экономическая оценка инвестиций производится методом определения чистого дисконтированного дохода (ЧДД):

$$\text{ЧДД} = \sum_{i=1}^t \text{ЧДД}_i, \quad (6.9)$$

где – ЧДД чистый дисконтированный доход проекта, руб.;  $t$  – срок действия проекта,  $t = 13$  лет;  $\text{ЧДД}_i$  – чистый дисконтированный доход  $i$  – го года, руб.

$$\text{ЧДД}_i = (П_i + A_i - K_i) \frac{1}{(1 + E_n)^{t_p}}, \quad (6.10)$$

где  $П_i$  – прибыль  $i$  – го года, руб.;  $A_i$  – амортизационные отчисления  $i$  –го года  $K_i$  – инвестиции в  $i$  – м году, руб.;  $\frac{1}{(1+E_n)^{t_p}}$  – коэффициент дисконтирования ( $K_d$ );  $E_n$  – норма дисконта;  $t_p$  – расчётный год.

Норма дисконта рассчитывается на основе премии за риск по формуле:

$$E_n = r_f + r_p + I, \quad (6.11)$$



где  $r_f$  – без рисковая процентная ставка,  $r_f = 4,56\%$ ;  $r_p = 5\%$  (интенсификация производства);  $I$  – инфляция,  $I = 4\%$  [36].

$$E_n = 4,56 + 5 + 4 = 13,56\%$$

Расчёт чистой текущей стоимости проекта сведён в таблицу:

Таблица 6.3 – Расчёт чистого дисконтированного дохода проекта

Год	i	$\Pi_i$ , руб	$K_i$ , руб	$\Pi_i - K_i$ , руб	$K_{di}$	ЧДД <sub>i</sub> , руб	ЧДД, руб
2022	0	0,00	225000000	-	1	-	-197029430,47
2023	1	694 278 450	25721550,00	668556900,00	0,88	612944173,19	415914742,72
2024	2	694 278 450	25721550,00	668556900,00	0,78	543291426,24	959206168,96
2025	3	694 278 450	25721550,00	668556900,00	0,68	473638679,28	1432844848,24
2026	4	694 278 450	25721550,00	668556900,00	0,60	417916481,72	1850761329,96
2027	5	694 278 450	25721550,00	668556900,00	0,53	369159558,85	2219920888,81
2028	6	694 278 450	25721550,00	668556900,00	0,47	327367910,68	2547288799,49
2029	7	694 278 450	25721550,00	668556900,00	0,41	285576262,51	2832865062,00
2030	8	694 278 450	25721550,00	668556900,00	0,36	250749889,03	3083614951,04
2031	9	694 278 450	25721550,00	668556900,00	0,32	222888790,25	3306503741,29
2032	10	694 278 450	25721550,00	668556900,00	0,28	195027691,47	3501531432,76
2033	11	694 278 450	25721550,00	668556900,00	0,25	174131867,38	3675663300,14
2034	12	694 278 450	25721550,00	668556900,00	0,22	153236043,30	3828899343,44
2035	13	694 278 450	25721550,00	668556900,00	0,19	132340219,21	3961239562,65

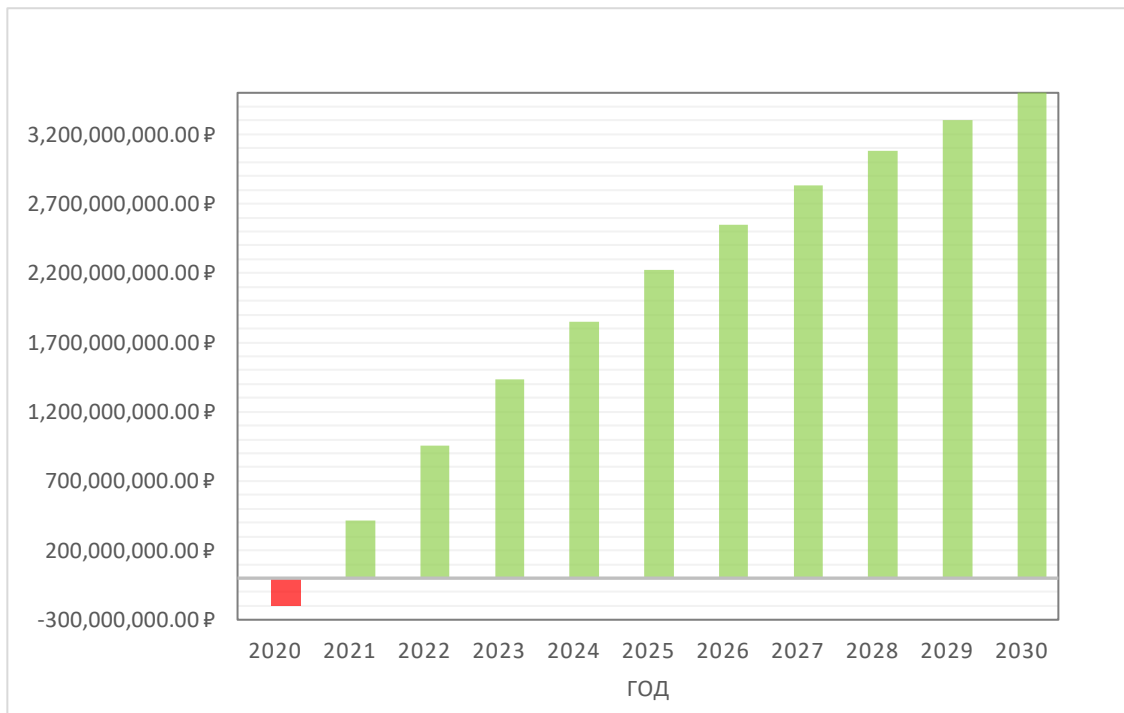


Рисунок 6.1 – График величины дисконтированного дохода проекта

Из графика видно, что проект внедрения технологии сверхзвуковой сепарации на платформу значительно экономически выгодный.

### 6.8 Окупаемость

Срок окупаемости проекта рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{окуп}} = T - \frac{\text{ЧДД}_t}{\text{ЧДД}_{t+1} - \text{ЧДД}_t} \quad (6.12)$$

где  $\text{ЧДД}_t$  – последняя отрицательная величина чистого дисконтированного дохода, руб.;  $\text{ЧДД}_{t+1}$  – первая положительная величина ЧДД, руб.;  $T$  – последний год, когда ЧДД был отрицателен.

$$T_{\text{окуп}} = 1 - \frac{-197029430}{612944173 - (-197029430)} = 1,2 \text{ года.}$$

Таким образом, проект полностью окупится через 1,5 года.

## Заключение

В ходе выпускной квалификационной бакалаврской работы был предложен сверхзвуковой сепаратор на МЛСП «Приразломная».

Для определённого давления и расхода газа на платформе был произведён конструктивный расчёт аппаратов сверхзвуковой сепарации и комбинированной сверхзвуковой сепарации.

Согласно расчётам, представлены графики распределения параметров газа в сопле Лавалья.

В ПО Unisim Design был промоделирован процесс сепарации в сверхзвуковом сепараторе, из которого выяснилось, что в результате работы установки выделяется 40000 тонн углеводородов в год. Был произведён экономический расчёт, который показал, что сверхзвуковой сепаратор на платформе «Приразломная» оказался экономически выгодным проектом.

## Список литературы

- 1) Об охране окружающей природной среды: федер. закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ: [принят Гос. Думой 20 декабря 2001 г.: в действующей редакции от 01.06.2020.] – М.: АО "Кодекс". – 147 с.
- 2) Об отходах производства и потребления: федер. закон от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ: [принят Гос. Думой 22 мая 1998 г.: в действующей редакции от 14.06.2020.] – М.: АО "Кодекс". – 105 с.
- 3) Об утверждении порядка обучения по охране труда и проверки знаний требований охраны труда работников организаций: постановление Минтруда РФ от 13 января 2003 г. № 1/29: [Зарегистрировано в Минюсте России 12 февраля 2003г.: в действующей редакции от 30.11.2016.] – М.: АО "Кодекс". – 24 с.
- 4) О промышленной безопасности опасных производственных объектов: федер. закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ: [принят Гос. Думой 20 июля 1997 г.: в действующей редакции от 29.07.2018.] – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. – 56 с.
- 5) ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. Система стандартов безопасности труда. – Введ. 1983-07-01. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2001 год. – 7 с. Дата актуализации (01.02.2020);
- 6) ГОСТ 12.1.004 – 91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. – Введ. 1992-06-30. - М.: Стандартиформ, 2006 год. – 48 с. Дата актуализации (06.04.2015);
- 7) ГОСТ 17.2.1.01 – 76. Охрана природы. Атмосфера. Классификация выбросов по составу. – Введ. 1977.01.01. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2004 год. – 4 с. Дата актуализации (01.06.2019);
- 8) ГОСТ 22.3.03 – 97. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Защита населения. Основные положения. – Введ. 1998.04.15 - М.: ИПК Издательство стандартов, 2002 год. - 10 с. Дата актуализации (06.04.2015);

9) ГОСТ 12.2.003 – 91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. – Введ. 1992.01.01 - М.: ИПК Издательство стандартов, 2001 год. - 18 с. Дата актуализации (06.04.2015);

10) ГОСТ 12.0.004 – 2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Организация обучения безопасности труда. Общие положения. – Введ. 2017.03.01 - М.: Стандартиформ, 2019 год. - 60 с. Дата актуализации (01.03.2017);

11) ГОСТ 12.1.019 – 2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – Введ. 2019.01.01 - М.: Стандартиформ, 2019 год. - 33 с. Дата актуализации (01.01.2019);

12) ГОСТ 17.1.3.13 – 86 Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнения. Контроль качества воды. – Введ. 1986.06.30 - М.: ФГУП "СТАНДАРТИНФОРМ", 2010 год. - 3 с. Дата актуализации (01.02.2020);

13) ГОСТ Р 54483 – 2011. Нефтяная и газовая промышленность. Платформы морские для нефтегазодобычи. Общие требования. – Введ. 2012.07.01. - М.: Стандартиформ, 2012 год. - 49 с. Дата актуализации (2012-07-01);

14) ГОСТ Р 51858 – 2002. Нефть. Общие технические условия Сырая нефть. Технические условия. Методы анализа. – Введ. 2002-07-01. - М.: Стандартиформ, 2006 год. - 10 с. – (Дата актуализации 08.09.2012);

15) ГОСТ 30319.1 – 2015. Газ природный. Методы расчёта физических свойств. Межгосударственный стандарт. – Введ. 2017.01.01. - М.: Стандартиформ. – 2016. - 16 с. Дата актуальности (01.01.2017);

16) СП 369.1325800.2017 Платформы морские стационарные. Правила проектирования. – Введ. 2018.06.15 - М.: Стандартиформ, 2018 год. - 44 с. Дата актуальности (15.06.2018);

17) СП 90.13330.2012 Электростанции тепловые. Актуализированная редакция СНиП II-58-75. – Введ. 2013.01.01 - М.: Минрегион России, 2012 год. - 113 с. Дата актуализации (2013-01-01);

18) СП 77.13330.2016 Системы автоматизации. Актуализированная редакция СНиП 3.05.07-85. – Введ. 2017.04.21. - М.: Стандартинформ, 2017. - 117 с. Дата актуализации (21.04.2017);

19) ГН 2.1.6.3492-17 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений. – Введ. 2018.01.20. – М.: Роспотребнадзор, 2019. - 63 с. Дата актуализации (22.12.2017);

20) Российский морской регистр судоходства (РМРС). Правила классификации и постройки морских судов. – 2007. Редакционная коллегия Российского морского регистра судоходства. 46 с. (Дата актуализации 25.11.2016);

21) Бирюк В.В., Веретенников С.В., Гурьянов А.И., Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект (Технические положения). – М.: Научтехлитиздат, 2014. Т.2 (Ч.1). 288 с.

22) Бородин К.А. Экономическая оценка освоения нефтяных месторождений арктического континентального шельфа. // Мурманский государственный технический университет. - Мурманск, 2014. - 166 с.

23) Дунаев В.Ф. Экономика предприятий нефтяной и газовой промышленности. Учебник. – М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 2006. – 352 с.

24) Муравьев В.М. Эксплуатация нефтяных и газовых месторождений. Москва «Недра». 1973 г., 384 стр., УДК: 622.276.3.

25) Никитин Б.А., Хведчук И.И. «Нефтяное месторождение Приразломное на Арктическом шельфе России». Геология нефти и газа, № 2. Москва 1997 г.

26) Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект. Том 1 (Физическое явление, эксперимент, теоретическое моделирование). – Изд. Научтехлитиздат. – 2013., 211 стр.

27) Жданов М.А. Нефтегазопромысловая геология и подсчет запасов нефти и газа. Учебное пособие для вузов по спец. "Геология и разведка нефть и газовых месторождений" / М. А. Жданов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1981. - 453 с.

28) Чуркаев А.М. Переработка нефтяных газов. Учебник для рабочих. М.: Недра. 1983. – 279с

29) Шипилов Э.В. «Месторождения углеводородного сырья российского шельфа Арктики: геология и закономерности размещения». Вестник МГТУ, том 3, №2, 2000 г.

30) Невоструев В. А. Комплексный подход к энергоэффективности при добыче нефти УЭЦН // Инженерная практика. 2017. № 8. С. 28–32.

31) Гальфанов Р.Р., Васильев А.Б., Мохнаткин И.В., Дозорцев В.М., Агафонов Д.В. Компьютерный тренажер для обучения операторов технологических процессов МЛСП «Приразломная» // Автоматизация в промышленности. – 2018. – №6 – с. 4-13.

32) Имаев С.З., Войтенков Е.В. Перспективные технологии извлечения кислых компонентов из природных газов // Нефтепромысловое дело. – 2013. – №4 – с. 17-23.

33) Саликаев Д. А., Гумеров О. А. Исследование процесса сверхзвуковой сепарации попутного нефтяного газа с помощью программного комплекса “Unisim design R400” // Нефтегазовое дело. – 2016 – №2 – с. 151 – 189.

34) Имаев С.З., Сафьянников М.И. Регулирование сверхзвуковых сепараторов. Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2016. – 98 –104 с.

35) Корытников Р.В., Яхонтов Д.А., Багиров Л.А., Дмитриев Л.М., Имаев С.З. Промышленные испытания технологии сверхзвуковой сепарации

на установке НТС УПИМТ УКГП Заполярного НГКМ // Нефтепромысловое дело. 2012. № 6. 36–40 с.

36) Лухтура Ф.И., Таблицы газодинамических функций Справочное пособие. – Мариуполь: ПГТУ, 2007. – 152 с.

37) Власенко В.С., Каракозов А.А., Ячный М.В., Первеев А.А., Зиновьев Е.В., Гужва В.Е., Левченко Л.Е. Анализ методов отделения природного газа от углекислого газа и технология сверхзвуковой сепарации на морских месторождениях // ООО «Газпром Трансгаз Казань» 30.10.2019. – 168 – 172 с.

38) Волков О.И., Скляренко В.К. Экономика предприятия: Курс лекций. - М.: ИНФРА-М, 2006. - 280 с.

39) Андреев О.П., Минигулов Р.М., Коротников Р.В., Багиров Л.А., Имаев С.З. Технологические схемы УКПГ на основе 3S-технологии для северных нефтегазоконденсатных месторождений //Наука и техника в газовой промышленности. –2009. – № 2. – Р. 4 – 10.

40) Багиров Л.А., Имаев С.З. Опыт применения 3S-технологии для обработки природного газа на газовых объектах России и Китая: Доклад на Российской нефтегазовой технической конференции. – 28.10.2015. – Москва // «Society of Petroleum Engineers».

41) Власенко В. С., Жидков Д. А., Слесаренко В. В., Карпов Г. М. Экспериментальное исследование трехпоточных вихревых труб с соплом Лавалья // Химическая технология, 2019, Т.20, № 2. С. 87-89;

42) Мохнаткин И.В., Билалов А. Д. Внедрение системы мониторинга и управления сигнализациями на МЛСП «Приразломная». В сб. тезисов конференции RAO CIS Offshore. — 2017. — С. 182–183.

43) Пасторов С.П., Мохнаткин И.В., Билалов А. Д. Внедрение симуляторов для динамического и статического моделирования технологических процессов платформы «Приразломная». В сб. тезисов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных



разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа (Арктика-2017). — 2017. — С. 104–106.

44) Фарахов Т.М., Исхаков А.Р., Минигулов Р.М. Высокоэффективное сепарационное оборудование очистки природного газа от дисперсной среды // Нефтегазовое дело. 2011. № 6. С. 263–277.

45) Чернов А.Н., Брещенко Е.М., Бобровников Г.Н., Поляков А.А., Исследование работы трёхпоточной вихревой трубы на нефтяном газе. Труды ВНИИ-ОЭНГ «Переработка нефтяных газов», М.: ВНИИ-ОЭНГ, вып. 7. – 1981. 115 – 123 с.

46) URL: [http://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/Arcticoil/Prirazlomnaya\\_environment\\_impact\\_assessment.pdf](http://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/Arcticoil/Prirazlomnaya_environment_impact_assessment.pdf) (Дата обращения: 06.05.2020).

47) URL: <https://www.gazprom-neft.ru/company/major-projects/prirazlomnoe/> (Дата обращения 14.04.2020).

48) URL: [https://shelf.gazprom-neft.ru/upload/iblock/3e3/GPN\\_Referat\\_05.09\\_final.pdf](https://shelf.gazprom-neft.ru/upload/iblock/3e3/GPN_Referat_05.09_final.pdf) (Дата обращения 11.05.2020).

49) URL: <http://www.newreferat.com/ref-28907-7.html> (Дата обращения 11.06.2020).

50) V. Alfyorov, L. Bagirov, L. Dmitriev, et al. Supersonic nozzle efficiently separates natural gas components. Oil & Gas Journal(2005), 5(103), pp.53-58.

51) Viktor S. Vlasenko, Vacheslav V. Slesarenko, Aleksander N. Gulkov, Dmitriy A. Zhidkov. Experimental Investigation of Vortex Tubes with Laval Nozzle. The Proceedings of the Twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference San Francisco, CA, USA, June 25-30, 2017. pp 721-728;

52) Liu Xingwei, Liu Zhongliang, Li Yanxia. Numerical Study of the High Speed Compressible Flow with Non-Equilibrium Condensation in a Supersonic

Separator. *Journal of Clean Energy Technologies*, September 2015, Vol. 3, No. 5, pp. 360–366.

53) José Luiz de Medeiros, Lara de Oliveira Arinelli, Alexandre Mendonça Teixeira, Ofélia de Queiroz Fernandes Araújo. “Offshore Processing of CO<sub>2</sub>-Rich Natural Gas with Supersonic Separator” // Springer Nature Switzerland AG 2019, 2019 – 348c. – ISBN 978-3-030-04005-5.

54) José Luiz de Medeiros, Lara de Oliveira Arinelli, Alexandre Mendonça Teixeira, Ofélia de Queiroz Fernandes Araújo. “Offshore Processing of CO<sub>2</sub>-Rich Natural Gas with Supersonic Separator” // Springer Nature Switzerland AG 2019, 2019 – 348c. – ISBN 978-3-030-04005-5.

## Приложение А

Таблица А.1 – Сравнительные характеристики работы блока НТС УПМТ с 3S – сепаратором и с дроссельным клапаном

Параметры	Сверхзвуковой сепаратор			Дроссельный клапан	
	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 2	Режим 3
Давление газа на входе в сепаратор 10С-1, МПа	11,78	11,50	11,03	11,51	11,00
Температура газа на входе в сепаратор 10С-1, °С	9,7	8,1	6,0	5,8	4,0
Давление газа в сепараторе 10С-2, МПа	4,60	7,64	7,60	7,66	7,66
Температура газа в сепараторе 10С-2, °С	-23,9	-24,9	-24,2	-28,5	-27,0
Давление товарного газа с УПМТ, МПа	7,49	7,56	7,53	7,53	7,53
Расход товарного газа с УМПТ, тыс. нм <sup>3</sup> /ч	11,430	11,190	10,650	10,240	10,170
Давление газа на входе в 3S, МПа	10,94	10,70	10,21	-	-
Температура газа на входе в 3S, °С	-9,6	-11,0	-12,1	-	-
Давление газожидкостной смеси на выходе из 3S, МПа	7,56	7,64	7,61	-	-
Давление очищенного газа на выходе из 3S, МПа	7,57	7,61	7,57	-	-
Температура очищенного газа на выходе из 3S, °С	-22,2	-23,4	-23,0	-	-
Точка росы по углеводородам очищенного газа на выходе из 3S, °С	-40	-40	-31	-	-
Точка росы по углеводородам товарного газа, °С	-29	-40	-34	-20	-22
Содержание C <sub>5+</sub> в очищенном газе на выходе из 3S, г/нм <sup>3</sup>	4,31	3,86	5,11	-	-
Содержание C <sub>5+</sub> в товарном газе, г/нм <sup>3</sup>	5,79	5,86	6,34	9,19	8,49