

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

Школа Инженерная школа природных ресурсов
 Направление подготовки 21.01.04 Нефтегазовое дело
 Отделение школы (НОЦ) Отделение нефтегазового дела

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Модернизация лабиринтных уплотнений центробежного компрессора путем внедрения в конструкцию барьерного и буферного газа

УДК 621.515-762.62

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ05	Михеев Тимофей Александрович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Зиякаев Григорий Ракитович	К.Т.Н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Валитова Елена Юрьевна	К.П.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Шарф Ирина Валерьевна	Д.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечин Андрей Александрович	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Манабаев Кайрат Камитович	к.ф.-м.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК-1	Способен решать производственные и (или) исследовательские задачи на основе фундаментальных знаний в нефтегазовой области
ОПК-2	Способен осуществлять проектирование объектов нефтегазового производства
ОПК-3	Способен разрабатывать научно-техническую, проектную и служебную документацию, оформлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации, рецензии
ОПК-4	Способен находить и перерабатывать информацию, требуемую для принятия решений в научных исследованиях и в практической технической деятельности
ОПК-5	Способен оценивать результаты научно-технических разработок, научных исследований и обосновывать собственный выбор, систематизируя и обобщая достижения в нефтегазовой отрасли и смежных областях
ОПК-6	Способен участвовать в реализации основных и дополнительных профессиональных образовательных программ, используя специальные научные и профессиональные знания
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способность оценивать эффективность инновационных решений и анализировать возможные технологические риски их реализации.
ПК(У) - 2	Способность анализировать и обобщать данные о работе технологического оборудования, осуществлять контроль и техническое сопровождение.
ПК(У)-3	Способность обеспечивать безопасную и эффективную эксплуатацию и работу технологического оборудования нефтегазовой отрасли.
ПК(У)-4	Знание современных САД-САЕ-систем, их функциональные возможности для проектирования геометрических моделей изделий высокой сложности.
ПК(У)-5	Способность применять полученные знания для разработки и реализации проектов, различных процессов производственной деятельности на основе методики проектирования в нефтегазовой отрасли, а также инструктивно-нормативных документов.
ПК(У)-6	Способность к разработке учебно-методических материалов для первичной и периодической подготовки и аттестации специалистов в области обеспечения работы технологического оборудования

Код компет енции	Наименование компетенции
ПК(У)-7	Способность реализовывать программы профессионального обучения: планировать и проводить учебные занятия, оценивать достижение планируемых результатов для первичной и периодической подготовки и аттестации специалистов в области обеспечения работы технологического оборудования

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

Школа: Инженерная школа природных ресурсов

Направление подготовки (специальность: 21.04.01 Нефтегазовое дело/ Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов)

Уровень образования магистратура

Отделение школы (НОЦ): Отделение нефтегазового дела

Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2021 /2022 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	18.06.22
--	----------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
17.03.22	1 Общая информация о концевых уплотнениях, применяемых в центробежных компрессорах	10
05.04.22	2 Лабиринтные уплотнения в составе центробежного компрессора	10
13.04.22	3 Модернизация концевых лабиринтных уплотнений в составе многоступенчатого центробежного компрессора	10
13.05.22	4 Аналитический расчет величины протечек газа через участки лабиринтного уплотнения	30
10.06.22	5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
25.05.22	6 Социальная ответственность	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Зиякаев Григорий Ракитович	К.Т.Н.		

Консультант (при наличии)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Валитова Елена Юрьевна	к.п.н.		

СОГЛАСОВАНО:**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Манабаев Кайрат Камитович	к.ф.-м.н.		

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

Школа: Инженерная школа природных ресурсов

Направление подготовки (специальность): 21.04.01 Нефтегазовое дело/ Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов

Отделение школы (НОЦ): Отделение нефтегазового дела

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерская диссертация

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ05	Михееву Тимофею Александровичу

Тема работы:

Модернизация лабиринтных уплотнений центробежного компрессора путем внедрения в конструкцию барьерного и буферного газа	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	08.02.22, 39-38/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	18.06.22
--	----------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является система лабиринтных уплотнений в составе трехкорпусного многоступенчатого центробежного компрессора. Режим работы – постоянный. Рабочая среда – пирогаз. Основное требование к проектированию – исключение загрязнения участков лабиринтного уплотнения для увеличения межремонтного периода компрессора.</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Разработке подлежит модернизированная схема лабиринтного уплотнения. Оценке подлежит количество утечек газа, проходящих через лабиринтные уплотнения. Исследованию и анализу подлежит влияние величины радиуса скругления на величину протечек.</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Отсутствует</p>

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение (раздел 5)</p>	<p>Шарф Ирина Валерьевна</p>
<p>Социальная ответственность (раздел 6)</p>	<p>Сечин Андрей Александрович</p>

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

<p>1 Общая информация о концевых уплотнениях, применяемых в центробежных компрессорах</p>
<p>2 Лабиринтные уплотнения в составе центробежного компрессора</p>
<p>3 Модернизация концевых лабиринтных уплотнений в составе многоступенчатого центробежного компрессора</p>

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	
--	--

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент</p>	<p>Зиякаев Григорий Ракитович</p>	<p>к.т.н.</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>2БМ05</p>	<p>Михеев Тимофей Александрович</p>		

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

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ05	Михеев Тимофей Александрович

Школа	Инженерная школа природных ресурсов	Отделение школы (НОЦ)	Отделение нефтегазового дела
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	21.04.01 «Нефтегазовое дело»/ «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Оценка стоимости материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих ресурсов на проведение модернизации концевых лабиринтных уплотнений турбокомпрессора
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Единые нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы. Общая часть.
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Налоговый кодекс Российской Федерации 2. ФЗ №67 от 24.07.2009 в ред. от 26.03.2022
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Обоснование перспективности мероприятий по модернизации концевых лабиринтных уплотнений турбокомпрессора
<i>2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Расчет доходов и затрат при проведении мероприятий по модернизации концевых лабиринтных уплотнений турбокомпрессора
<i>3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Оценка экономической эффективности модернизации концевых лабиринтных уплотнений турбокомпрессора

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Таблицы:

- 1) Затраты на оплату труда специалистов;
- 2) Затраты на оплату труда и командировочных выездных специалистов;
- 3) Затраты на оплату труда ремонтной бригады;
- 4) Затраты на страховые взносы специалистов;
- 5) Затраты на страховые взносы выездных специалистов;
- 6) Затраты на страховые взносы ремонтной бригады;
- 7) Затраты на материалы;
- 8) Затраты на амортизационные отчисления;
- 9) Затраты на комплектующие;
- 10) Затраты на проведение мероприятия.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОНД	Шарф И.В.	Д.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ05	Михеев Тимофей Александрович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 2БМ05		ФИО Михеев Тимофей Александрович	
Школа	Инженерная школа природных ресурсов	Отделение (НОЦ)	Отделение нефтегазового дела
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	21.04.01 «Нефтегазовое дело»/ «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов»

Тема ВКР:

Модернизация лабиринтных уплотнений центробежного компрессора путем внедрения в конструкцию затворного газа

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

Введение

- Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.
- Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации

Объект исследования: концевые лабиринтные уплотнения центробежного компрессора
Область применения: нефтехимия, многосекционный центробежный компрессор
Рабочая зона: производственное помещение
Размеры помещения: не определены
Количество и наименование оборудования рабочей зоны: один многосекционный центробежный компрессор
Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: компримирование пиролизного газа

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации:

- специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;
- организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

приказ Ростехнадзора № 533 от 15.12.2020 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств" приказ Ростехнадзора от 29 марта 2016 года № 125 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности нефтегазоперерабатывающих производств"; Федеральный закон от 28.12.2013 № 426-ФЗ "О специальной оценке условий труда"

<p>2. Производственная безопасность при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Вредные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> - повышенный уровень общей вибрации; - повышенный уровень локальной вибрации; - повышенный уровень и другие неблагоприятные характеристики шума; - отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения. <p>Опасные производственные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> - опасные и вредные производственные факторы, связанные с чрезмерным загрязнением воздушной среды в зоне дыхания; - Движущиеся твердые, жидкие или газообразные объекты, наносящие удар по телу работающего. <p>Расчет системы воздухообмена</p> <p>Пожарная безопасность</p> <p>Категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности;</p> <p>Мероприятия по обеспечению пожарной безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> - системы по предотвращению пожара; - системы противопожарной защиты; - организационно-технические мероприятия по обеспечению пожарной безопасности. <p>Основные средства пожаротушения, применяемые на установке;</p> <p>Наиболее вероятные причины возникновения взрывов и пожаров на установке.</p>
<p>3. Экологическая безопасность при эксплуатации</p>	<p>Воздействие на селитебную зону: выброс опасных веществ при разгерметизации оборудования</p> <p>Воздействие на литосферу: загрязнение почвы при утечке отработанных смазочных материалов на месте накопления отходов</p> <p>Воздействие на гидросферу: объект исследования напрямую не оказывает негативного влияния на гидросферу</p> <p>Воздействие на атмосферу: загрязнение атмосферы вследствие утечек пиролизного газа</p>

<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях <u>при эксплуатации</u></p>	<p>Возможные ЧС:</p> <ul style="list-style-type: none"> - природные (авария вследствие сильного или разрушительного землетрясения); - техногенные (прекращение подачи азота в камеру подачи уплотнения, прекращение подачи метана в камеру подачи уплотнения, повышение давления пирогаза на входе в компрессор) <p>Наиболее типичная ЧС: прекращение подачи азота в камеру подачи уплотнения</p>
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p>	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечин Андрей Александрович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ05	Михеев Тимофей Александрович		

РЕФЕРАТ

Отчет 00 с., 00 рис., 00 табл., 00 источн., 0 прил.

ЛАБИРИНТНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ, ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ КОМПРЕССОР, РАСЧЕТ ПРОТЕЧЕК, МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНЦЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ, РАДИАЛЬНЫЙ ЗАЗОР, РАДИУС СКРУГЛЕНИЯ ГРЕБНЯ

Объектом исследования является система концевых лабиринтных уплотнений в составе трехкорпусного многоступенчатого центробежного компрессора.

Целью работы являлась оценка величины протечек через радиальные зазоры участков модернизированной системы концевых лабиринтных уплотнений центробежного компрессора, а также анализ влияния величины радиуса скругления гребней на величину протечки через уплотнение.

Методика исследования опирается на анализ теоретических расчетов, описанных в руководящем техническом материале [2].

Анализ результатов расчетов показал снижение протечек газа для гребней с меньшим радиусом скругления. При этом, при увеличении радиального зазора наблюдалось снижение динамики роста расхода от увеличения радиуса скругления.

Рассмотренная модернизация системы концевых лабиринтных уплотнений нашла применение на установке компримирования и разделения пирогаза в трехкорпусном многоступенчатом центробежном компрессоре.

Внедрение данной модернизации способствует увеличению межремонтного периода центробежного турбоагрегата благодаря снижению загрязнения участков лабиринтного уплотнения.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения и обозначения:

b – ширина гребня, мм;

d – диаметр, мм;

δ – радиальный зазор уплотнения, мм;

G – протечка газа через уплотнение, кг/с;

μ – молярная масса, г/моль;

p – давление, Па;

ρ – плотность, кг/м³;

R – газовая постоянная, $\frac{Дж}{г \cdot К}$;

v – удельный объем, м³/кг;

δ – радиальный зазор уплотнения, мм;

t – шаг гребня, мм;

θ – угол, градусы;

t_r – температура газа, °С;

V – расход газа при нормальных условиях, нм³/ч;

z – количество гребней;

ДВК – довзрывная концентрация;

ОПО – опасный производственный объект;

ПДК – предельно допустимая концентрация;

СГУ – сухие газодинамические уплотнения;

ЦВД – цилиндр высокого давления;

ЦНД – цилиндр низкого давления;

ЦСД – цилиндр среднего давления.

ВВЕДЕНИЕ	15
1 Общая информация о концевых уплотнениях, применяемых в центробежных компрессорах	17
1.1 Назначение и классификация уплотнений.....	17
1.2 Сухие газодинамические уплотнения	20
2 Лабиринтные уплотнения в составе центробежного компрессора.....	23
2.1 Принцип действия лабиринтного уплотнения	23
2.2 Классификация лабиринтных уплотнений	24
2.3 Особенности эксплуатации лабиринтных уплотнений	26
2.4 Системы лабиринтных уплотнений с подводом затворного газа.....	27
3 Модернизация концевых лабиринтных уплотнений в составе многоступенчатого центробежного компрессора	29
3.1 О компрессорном агрегате	29
3.2 Штатная система концевых лабиринтных уплотнений.....	31
3.3 Описание модернизированной системы концевых лабиринтных уплотнений.....	33
4 Аналитический расчет величины протечек газа через участки лабиринтного уплотнения	36
4.1 Методика расчета	36
4.2 Расчет параметров рабочего газа	36
4.3 Расчет параметров уплотнения цилиндра среднего давления (ЦСД) ...	37
4.4 Расчет параметров уплотнения цилиндра высокого давления (ЦВД) ...	56
4.6 Результаты расчетов протечек с учетом скругления гребней в 0,2, 0,5 и 1,5 мм.....	74
4.7 Анализ влияния величины скругления гребней на величину протечки через участки лабиринтного уплотнения ЦВД	75
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение... 78	
Введение.....	78
5.1 Капитальные вложения.....	78
5.2 Оценка экономической эффективности	86
Заключение	87
6 Социальная ответственность	88
Введение.....	88
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	88

6.2 Производственная безопасность.....	90
6.3 Пожарная безопасность	97
6.4 Экологическая безопасность.....	101
6.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	102
Заключение	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	105
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	109

ВВЕДЕНИЕ

Предприятия, эксплуатирующие компрессорные агрегаты, со временем сталкиваются с необходимостью проведения модернизации. Это может быть обусловлено производственной необходимостью, когда требуется качественно или количественно увеличить выпуск продукции, или же жесткими требованиями по охране труда, промышленной безопасности и экологии на опасном производственном объекте (ОПО).

Оборудование может работать с совершенно разными, по своим физико-химическим свойствам, веществами. Некоторые вещества могут представлять серьезную опасность для человека, поэтому существуют такие узлы как уплотнения, которые направлены на герметизацию внутренней рабочей части машины.

Уплотнения являются наиболее ответственным узлом для роторов турбомашин, где скорости вращения достаточно высоки, а утечки некоторых веществ допустимы в минимальном количестве, либо недопустимы вовсе. Несмотря на широкое распространение сухих газодинамических уплотнений, система концевых лабиринтных уплотнений с подведением буферного и затворного газа также может применяться при работе компрессора с агрессивными и взрывоопасными газами. Описание схожей системы концевых лабиринтных уплотнений описаны в работе [1].

Рассмотрению методологических подходов к задачам проектирования и исследования лабиринтных уплотнений посвящена работа [4].

Исследование величины протечек через лабиринтные уплотнения с помощью средств компьютерного моделирования отражено в работе [5].

Центробежный компрессор состоит из трех корпусов и пяти ступеней сжатия. Концевые лабиринтные уплотнения ступенчатого типа с выступами и чередующимися короткими и длинными гребнями.

В ходе выполнения поставленной цели были решены следующие задачи:

- рассмотрены конструкции концевых уплотнений центробежных компрессоров;
- подобрана оптимальная для данных условий эксплуатации система концевых лабиринтных уплотнений с подведением буферного и затворного газа;
- произведены аналитические расчеты величин протечек через участки лабиринтных уплотнений с радиальным зазором 0,35 и 0,5 мм;
- произведена оценка влияния радиуса скругления гребней в 0,2, 0,5 и 1,5 мм на величину протечки через участок уплотнения.

1 Общая информация о концевых уплотнениях, применяемых в центробежных компрессорах

1.1 Назначение и классификация уплотнений

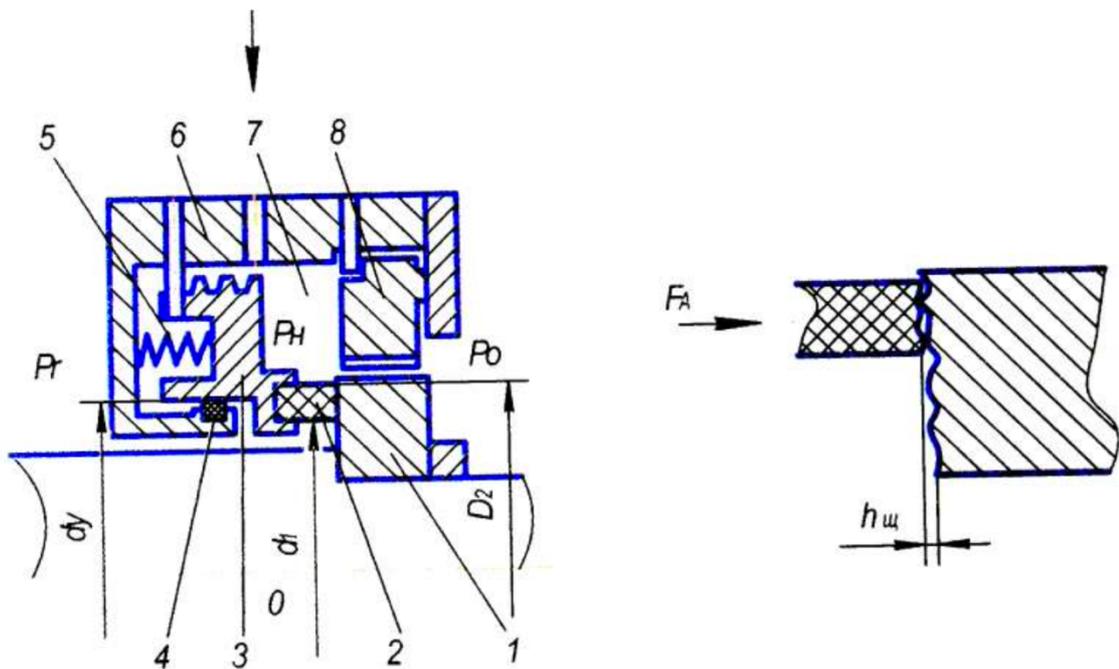
Уплотнения представляют собой устройства, которые предназначены для сокращения или недопущения протечек рабочей среды из одной области в другую.

Уплотнения могут применяться в неподвижных и подвижных деталях. В подвижных деталях по конструктивному исполнению уплотнения могут быть контактными и бесконтактными.

1.1.1 Контактные уплотнения

Контактные уплотнение представляет собой устройство, уплотняющее действие которого основано на контакте подвижной и неподвижной детали. Наиболее типичными представителями контактных уплотнений являются сальниковые, манжетные и торцовые.

Среди контактных уплотнений применение в центробежных компрессорах нашли лишь торцовые уплотнения с гидравлическим затвором. На рисунке 1 показана схема торцового уплотнения с гидравлическим затвором.



1 – упорный диск; 2 – уплотнительное графитовое кольцо; 3 – аксиально-подвижный элемент (втулка); 4 – резиновое уплотнительное кольцо; 5 – пружина; 6 – корпус; 7 – полость затворного масла; 8 – плавающее уплотнительное кольцо

Рисунок 1 – Схема торцового уплотнения с гидравлическим затвором

Пару трения в торцовом уплотнении с гидравлическим затвором составляют: аксиально-подвижный элемент, графитовое кольцо и упорный диск. Затворной средой является минеральное масло, которое подается под давлением на 0,03-0,5 МПа выше давления уплотняемого газа и снимает тепловой поток с пары трения.

Торцовые уплотнения наиболее приспособлены к таким условиям эксплуатации, где давление рабочей среды довольно велико, а утечки допустимы лишь в минимальном количестве. Такие условия эксплуатации характерны для магистральных газопроводов, химической и нефтеперерабатывающей промышленности, а также холодильных установок различной мощности.

Основными преимуществами таких уплотнений перед плавающими уплотнениями с гидрозатвором являются: сохранение герметичности при простое компрессора; меньшая чувствительность к высоким радиальным

вибрациям ротора; меньшая чувствительность к осевым смещениям ротора относительно корпуса компрессора.

Но такие уплотнения не лишены недостатков. Высокая герметичность ведет к повышенному износу пары трения. Уязвимым элементом в конструкции является графитовое кольцо, которое под воздействием повышенных силовых и температурных деформаций может внезапно разрушиться, что приведет к повышенной утечке газа и, как следствие, возникновению аварийной ситуации. Также торцовые уплотнения с гидравлическим затвором труднодоступны для обслуживания и ремонта.

1.1.2 Бесконтактные уплотнения

Бесконтактное уплотнение не предусматривает тот самый контакт между двумя деталями. Уплотняющее действие бесконтактного уплотнения основано на потерях энергии рабочего вещества при прохождении зазоров и камер, образованных подвижными и неподвижными элементами.

Бесконтактные уплотнения можно классифицировать на статические и динамические.

Бесконтактные уплотнения статического действия

К бесконтактным уплотнениям статического действия можно отнести следующие уплотнения:

- щелевые;
- лабиринтные.

Бесконтактные уплотнения динамического действия

К бесконтактным уплотнениям динамического действия относятся уплотнения:

- динамические радиальные:
 - 1) винтовые;
 - 2) лабиринтно-вихревые;
- динамические торцовые:
 - 1) дисковые;
 - 2) лопастные;

3) гидростатические;

4) центробежные.

Наибольшее распространение в конструкциях центробежных компрессоров получили следующие уплотнения: лабиринтные, лабиринтные с подводом затворного газа, щелевые и радиально-щелевые. Стоит отметить, что в современных компрессорах, работающих в условиях, где утечки недопустимы, устанавливаются сухие плавающие уплотнения с газовым затвором или бесконтактные торцовые газодинамические уплотнения.

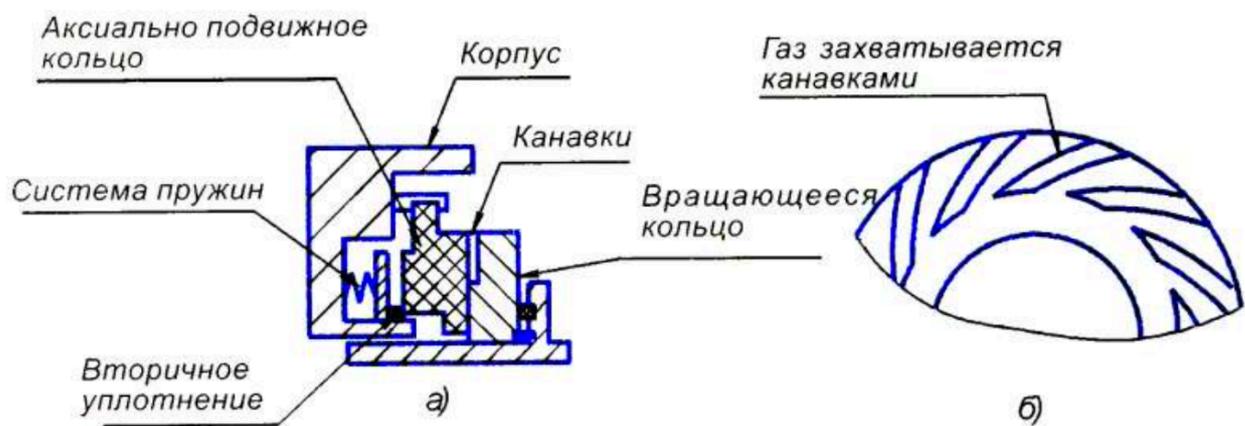
1.2 Сухие газодинамические уплотнения

Сухие газодинамические уплотнения (СГУ) в настоящее время довольно распространены как при модернизациях концевых уплотнений на уже работающих компрессорах, так и при изготовлении в составе новых компрессоров.

Использование СГУ в компрессоре обусловлено следующими преимуществами:

- снижаются утечки рабочего и затворного газа на уплотнение из-за небольшого уплотнительного зазора;
- снижаются потери мощности на трение из-за малой вязкости газа;
- снижаются эксплуатационные и ремонтные расходы, так как исключается сложная и дорогостоящая масляная система;
- минимальное загрязнение рабочего газа из-за отсутствия масла в системе;
- высокая надежность системы уплотнений.

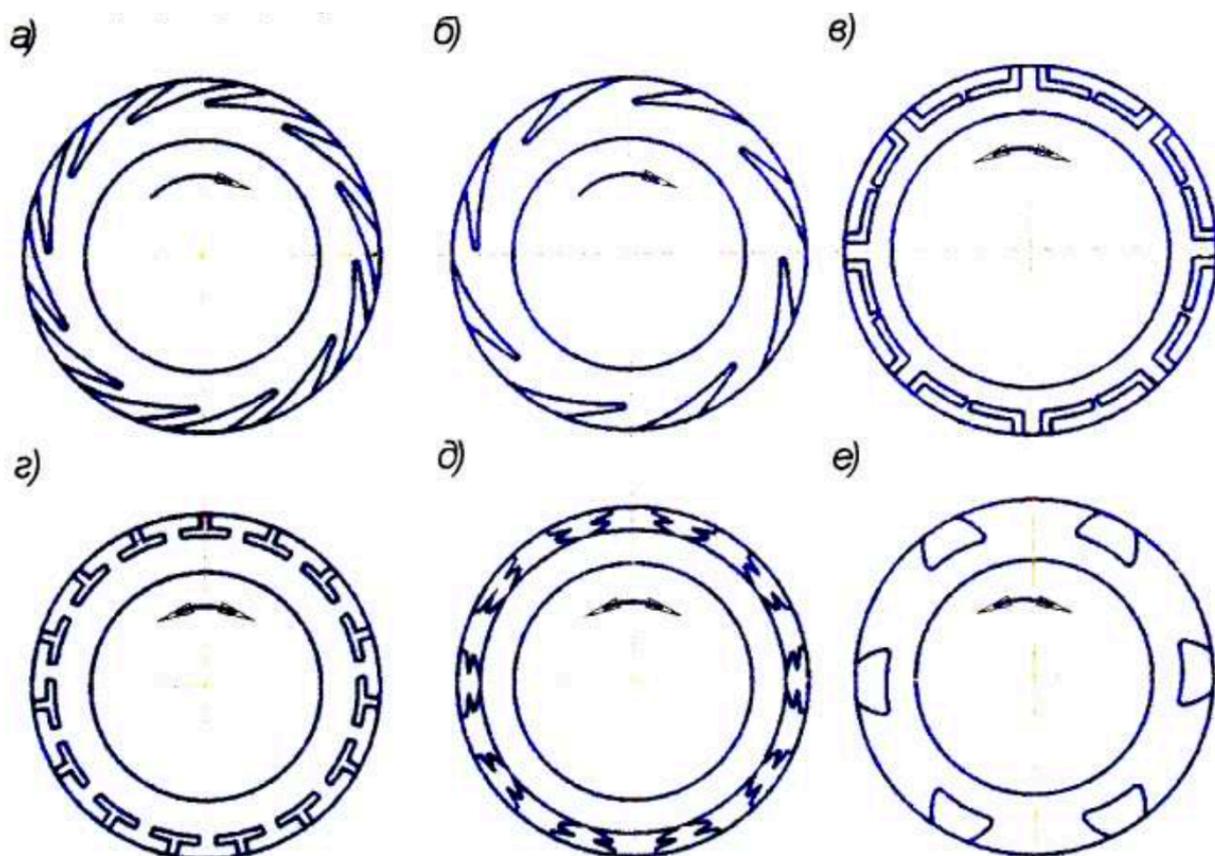
Главным компонентом СГУ является уплотнительная пара, состоящая из двух колец – вращающегося и аксиально-подвижного. В рабочем состоянии зазор между уплотнительной парой составляет 3-4 мкм. На уплотнительной поверхности вращающегося кольца нанесены микроканавки, благодаря которым создается и поддерживается газодинамическое давление в зазоре. На рисунке 2 изображена принципиальная схема СГУ.



а) – профиль уплотнения; б) – вращающееся кольцо

Рисунок 2 – Принципиальная схема СГУ

На практике широкое распространение получили канавки двух видов: с постоянной угловой шириной и клиновидные (рисунок 3, а и б). Недостатком уплотнений с такими формами канавок является работоспособность только одном направлении вращения вала. Требование по возможности вращения в обратную сторону может быть обусловлено особенностями пусковых операций компрессора. Лишены такого недостатка вращающиеся кольца с реверсивными канавками (рисунок 3, в-е). Различные формы микроканавок представлены на рисунке 3.



а) – с постоянной угловой шириной; б) – клиновидные; в) – «Г»-образные комбинированные; г) – «Т»-образные; д) – трапецевидные; е) – «U»-образные

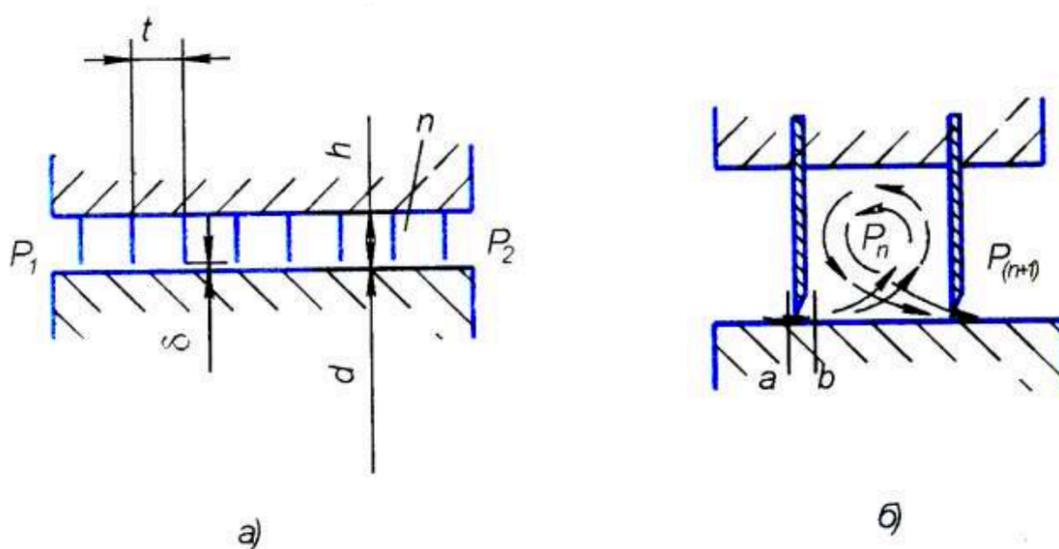
Рисунок 3 – Формы микроканавок вращающегося диска

В зависимости от условий эксплуатации СГУ могут иметь несколько исполнений: одинарное, тандемное, двойное и тройное. Основное отличие данных исполнений заключается в уплотняющих свойствах. Так, например, одинарное уплотнение подойдет при использовании нейтральных газов, утечка которых в минимальном количестве в атмосферу допустима. дальнейшее повышение количества секций (двойные, тройные) уплотнения и их взаимное расположение (тандемное) обусловлено более жесткими требованиями безопасности при эксплуатации компрессоров, работающих на взрывоопасных и токсичных газах.

2 Лабиринтные уплотнения в составе центробежного компрессора

2.1 Принцип действия лабиринтного уплотнения

Лабиринтное уплотнение относится к бесконтактным типам уплотнений, а значит никакого непосредственного контакта между двумя деталями уплотнения не происходит. Для того, чтобы понять, как работает лабиринтное уплотнение, стоит рассмотреть его принципиальную схему. На рисунке 4 представлена принципиальная схема лабиринтного уплотнения.



а) – участок лабиринтного уплотнения; б) – увеличенное изображение участка между двумя гребнями

Рисунок 4 – Принципиальная схема лабиринтного уплотнения

Представим, что имеется две области с некоторым газом, разделенные участком лабиринтного уплотнения. В области P_1 давление газа несколько выше давления того же газа в области P_2 . Это значит, что давление будет стремиться уравниваться, поэтому будет возникать переток газа из области P_1 в область P_2 . Но на пути у газа возникает препятствие в виде участка лабиринтного уплотнения, газ, проходя через него, теряет часть своей энергии на преодоление этого препятствия, в результате чего до области P_2 доходит лишь небольшое его количество.

Работа лабиринтного уплотнения основана на явлении дросселиции. Кинетическая энергия, возникающая из-за разности потенциальных энергий

среды, переходит в тепловую энергию из-за возникновения силы трения между поверхностью элементов, образующих лабиринтное уплотнение, и газом. Участок уплотнения, образующий сужение, называют дросселем. Лабиринтное уплотнение образовано чередованием таких участков. На рисунке 5 представлено изменение давления при прохождении потока газа через дроссель.

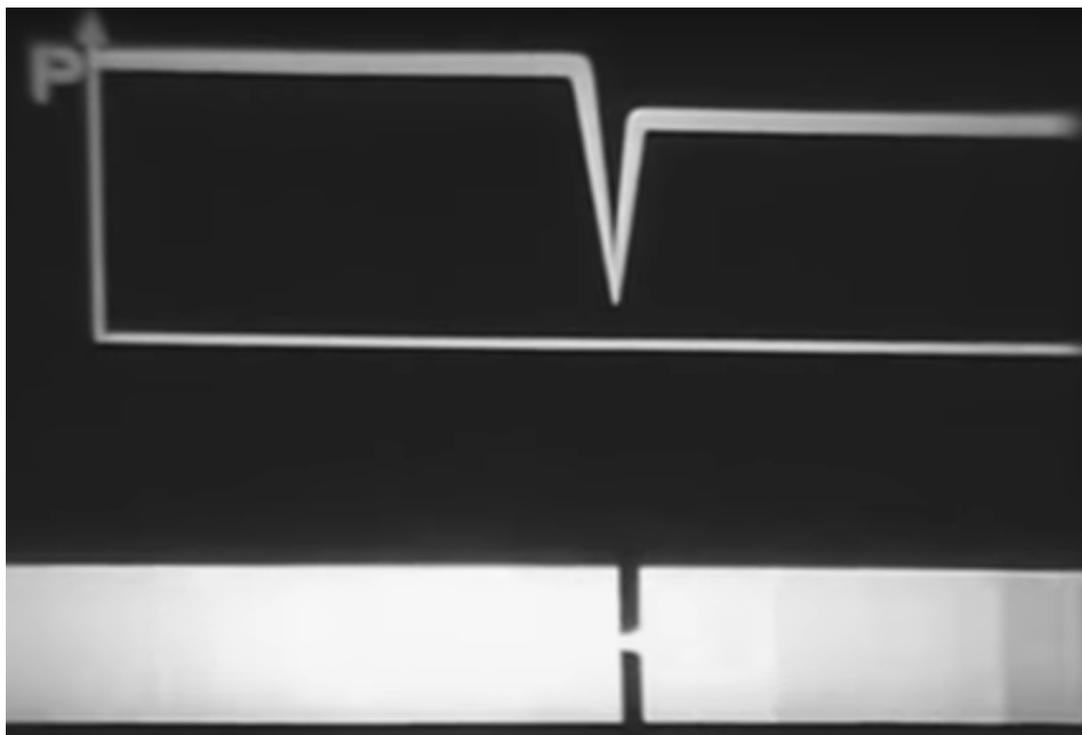


Рисунок 5 – Принципиальное отображение изменения давления при прохождении через дроссель

Чередование таких сужений приводит к довольно значительным потерям кинетической энергии газа, что в конечном итоге ведет к снижению перетока из одной области в другую.

2.2 Классификация лабиринтных уплотнений

Лабиринтные уплотнения можно классифицировать по признакам следующего характера:

- функционального – по назначению:
 - 1) концевые;
 - 2) диафрагменные;
 - 3) уплотнения лопаточного аппарата;

- 4) уплотнения штоков;
- аэродинамического:
 - 1) прямоточные;
 - 2) ступенчатые;
- геометрического:
 - 1) по ориентации уплотнительного зазора относительно оси вращения (с радиальными и осевыми зазорами);
 - 2) по относительной протяженности зазора в направлении утечки (щелевые и гребенчатые);
- кинематического – по общему направлению движения среды относительно оси вращения:
 - 1) осевые;
 - 2) радиальные;
 - 3) диагональные;
- конструктивно-технологического:
 - 1) по наличию специального узла, несущего уплотнительные элементы ротора (втулочные и безвтулочные);
 - 2) по наличию специального узла, несущего уплотнительные элементы статора (с обоймами и без обойм);
 - 3) по типу крепления уплотнительных деталей статора (жесткие, гибкие и термоэластичные);
 - 4) по месту расположения уплотнительных гребней (гребни на роторе, гребни на статоре и комбинированное расположение гребней);
 - 5) по конструкции уплотнительных гребней (с цельноточеными гребнями, со вставными (зачеканенными) гребнями).

Лабиринтные уплотнения с радиальным зазором бывают следующих исполнений: прямоточное; ступенчатое с выступами и чередующимися короткими и длинными гребнями; ступенчатое с выступами и увеличенным

числом коротких гребней; ступенчатое комбинированное с чередующимися гребнями ротора и статора.

Лабиринтные уплотнения с осевым зазором представлены следующим исполнением: гарантированно бесконтактными с чередующимися гребнями ротора и статора.

2.3 Особенности эксплуатации лабиринтных уплотнений

Лабиринтные уплотнения в центробежных компрессорах могут быть концевыми и межступенчатыми (лопаточными). В первом случае лабиринтное уплотнение служит для снижения утечек из корпуса центробежного компрессора, а во втором снижает переток газа в лопаточном аппарате. На рисунке 6 изображена промежуточная ступень центробежного компрессора, где красными эллипсами обведены участки лабиринтов.

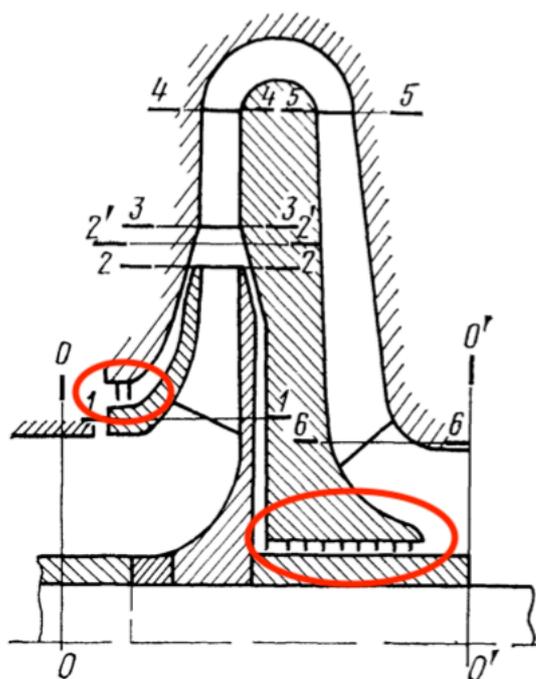


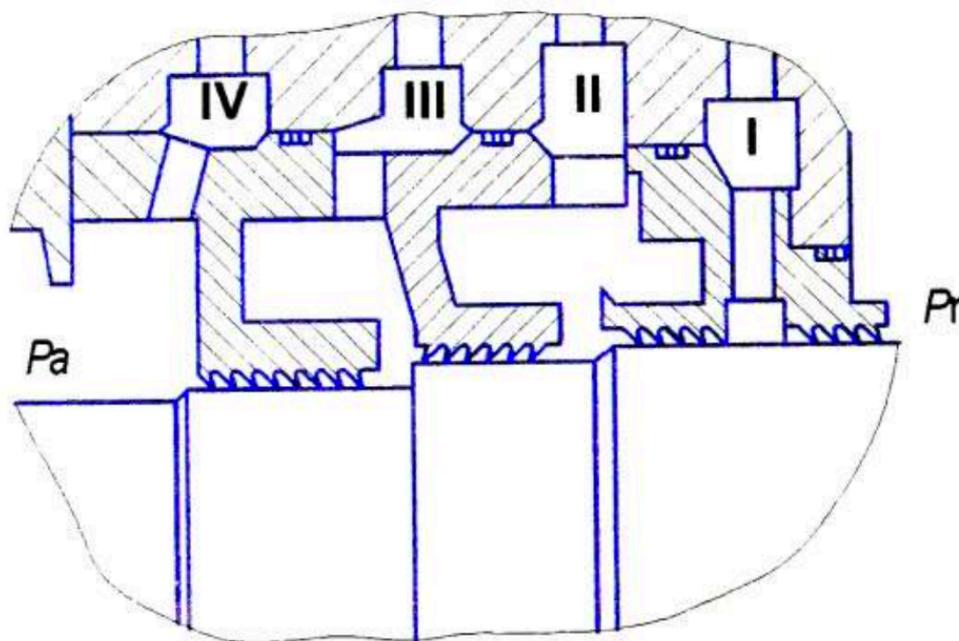
Рисунок 6 – Промежуточная ступень центробежного компрессора

Лабиринтные уплотнения, применяемые в качестве концевых, наиболее просты для технического обслуживания. Но они не лишены недостатков. Наиболее очевидным недостатком являются повышенные потери рабочего газа, которые могут составлять от 3 до 9 % расхода, проходящего через корпус сжатия.

Таким образом в своем классическом исполнении лабиринтные уплотнения допустимо применять, если рабочая среда является нейтральной (воздух, азот). Если же рабочая среда является агрессивной или взрывоопасной, то в конструкцию такого уплотнения необходимо добавить подвод затворного газа, который будет подпирать рабочий газ, не давая ему свободно выходить наружу. В зависимости от условий эксплуатации в качестве затворного газа допустимо применять воздух или азот.

2.4 Системы лабиринтных уплотнений с подводом затворного газа

Системы лабиринтных уплотнений с подводом затворного газа применяются в тех случаях, когда компрессор работает с взрывоопасными газами. Тогда в систему уплотнений подводится так называемый затворный или барьерный газ, который запирает рабочий газ и не дает ему проникнуть наружу. На рисунке 7 показана схема системы лабиринтных уплотнений с применением затворного газа.



I – камера утечек; II – камера отвода смеси рабочего и затворного (барьерного) газа; III – камера подачи затворного (барьерного) газа; IV – камера отвода затворного (барьерного) газа

Рисунок 7 – Схема лабиринтного уплотнения с применением затворного газа

Затворный газ подводится через камеру III и далее расходится в камеры II и IV. Давление затворного газа несколько больше давления рабочего газа, поэтому и происходит запираение рабочего газа. Через камеру II смесь двух газов отводится из корпуса компрессора, а излишки затворного газа отводятся через камеру IV. Камера утечек I соединена с первой ступенью всасывания компрессора для выравнивания давлений перед уплотнениями компрессорной установки в целом. Это позволяет использовать единую систему подвода затворного газа во все уплотнения компрессора.

3 Модернизация концевых лабиринтных уплотнений в составе многоступенчатого центробежного компрессора

3.1 О компрессорном агрегате

3.1.1 Место компрессорного агрегата в составе технологической цепочки

Компрессорный агрегат находится на установке компримирования и разделения пирогаза. Данная установка предназначена для ступенчатого сжатия пирогаза для выделения из него мономеров – этилена и пропилена, а также очищения от водорода и метана.

3.1.2 Описание компрессорного агрегата

Компрессорный агрегат состоит из привода – паровой турбины и самого центробежного компрессора.

Паровая турбина однокорпусная, конденсационная, с одним регулируемым отбором пара. Основные характеристики турбины:

- номинальная мощность 28100 кВт;
- номинальное число оборотов 5660 об/мин;
- диапазон рабочего числа оборотов турбины 5000-5885 об/мин.

Турбина приводится в движение паром, который получается при охлаждении горячего пирогаза водой в закалочно-испарительных аппаратах (ЗИА). Поступающий в турбину пар имеет номинальное давление в 110 кгс/см² и номинальную температуру 540 °С.

Соединение вала приводной турбины с валом компрессора осуществляется посредством специальной зубчатой муфты и торсиона. Со стороны паровой турбины находится зубчатый венец, который при останове турбины входит в зацепление с шестерней валоповоротного устройства.

Пятиступенчатая проточная часть встроена в трехкорпусный радиальный турбокомпрессор. Корпуса сжатия имеют горизонтальную плоскость разъема. На рисунке 8 показан компрессорный агрегат, установленный в машинном зале.



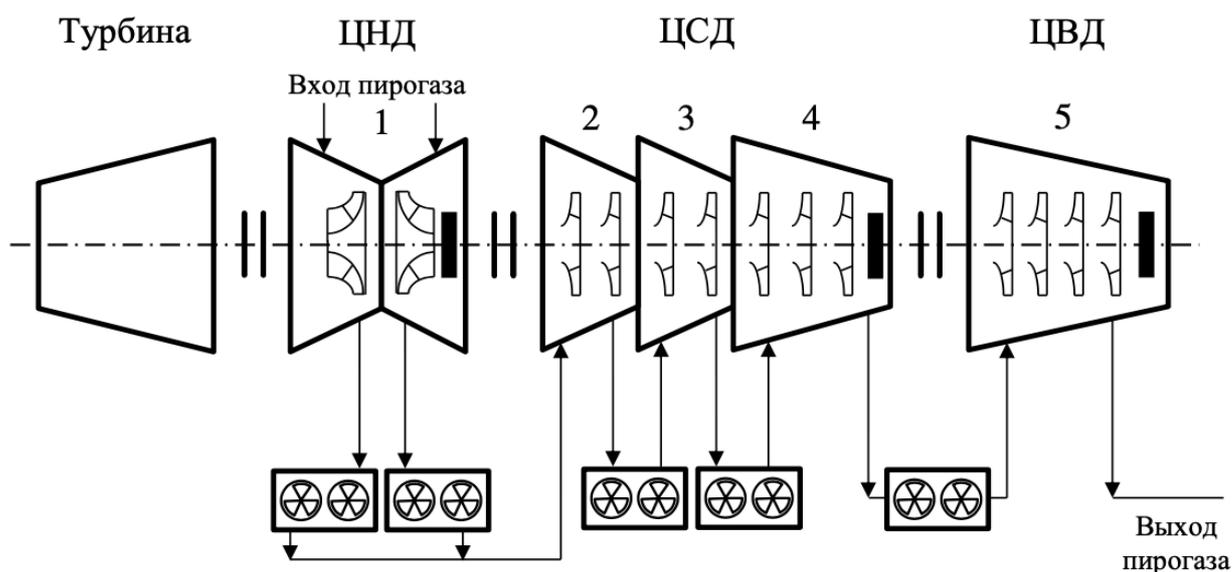
Рисунок 8 – Компрессорный турбоагрегат в машинном зале

Компрессор имеет следующие характеристики (рабочая среда – пирогаз):

- расход на всасывании – 131925 кг/ч;
- давление на всасывающей патрубке – 1,25 кгс/см²;
- давление на нагнетательной патрубке – 41,2 кгс/см²;
- температура на всасывающей патрубке – 40 °С;
- температура на нагнетательной патрубке – 117 °С.

Принципиальная схема компрессорного агрегата показана на рисунке

9.



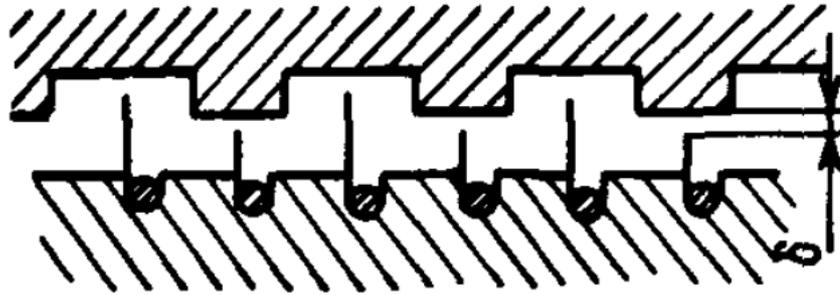
Цифрами обозначены ступени центробежного компрессора

Рисунок 9 – Схема компрессорного турбоагрегата

Пирогаз последовательно проходит каждую из пяти ступеней сжатия, при этом после каждой ступени перед входом на следующую газ охлаждается в промежуточных газоохладителях воздушного типа.

3.2 Штатная система концевых лабиринтных уплотнений

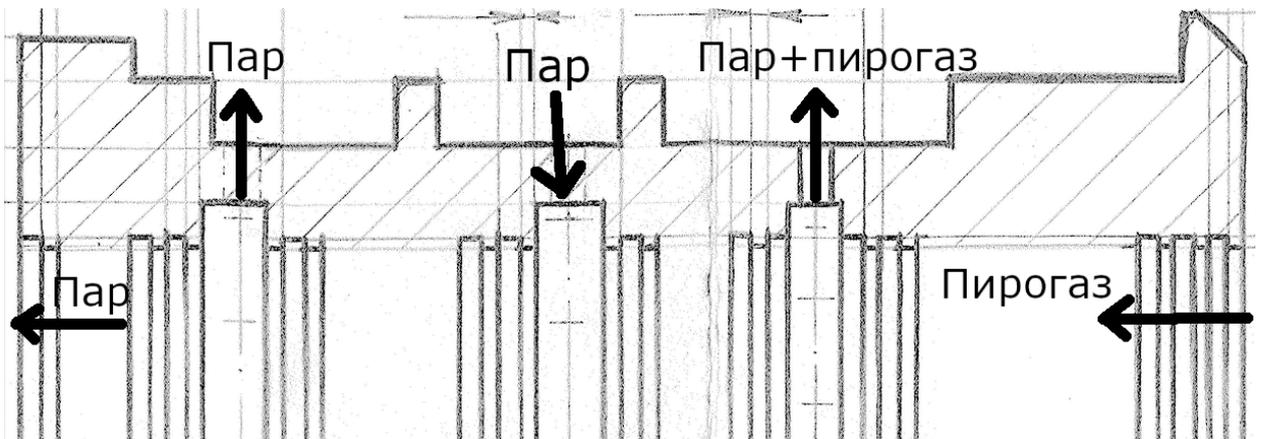
Концевые лабиринтные уплотнения разбиты на 8 рядов (по 4 ряда на каждом конце вала), каждый ряд объединен общей обоймой. Штатное уплотнение относится к ступенчатым лабиринтным уплотнениям с выступами и чередующимися короткими и длинными гребнями. Уплотнение образовано зачеканенными на роторе гребнями и выточенными в статорной обойме ступенями. На рисунке 10 изображена принципиальная схема ступенчатого уплотнения с выступами и чередующимися короткими и длинными гребнями.



Верхняя часть – статорная обойма уплотнения; нижняя часть – вал ротора

Рисунок 10 – Схема ступенчатого уплотнения с выступами и чередующимися короткими и длинными гребнями

Схема движения пара и пирогаза в обойме показана на рисунке 11.

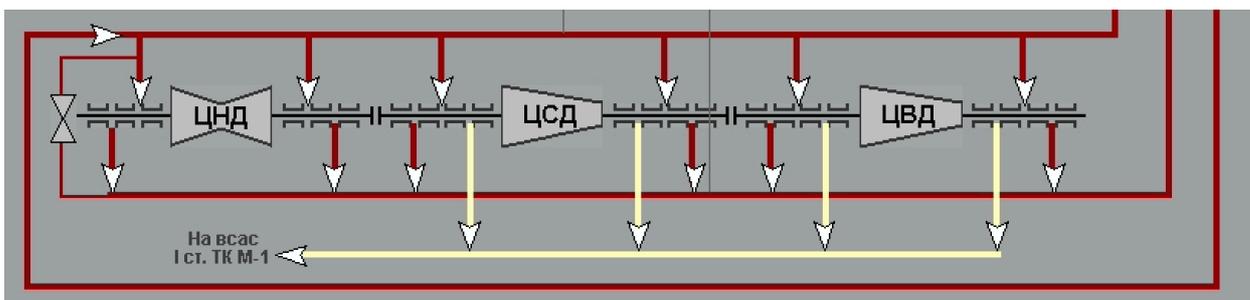


Стрелками указано направление потока

Рисунок 11 – Профиль статорной обоймы лабиринтного уплотнения

Существующая система концевых лабиринтных уплотнений запирается водяным паром, подводимым из паровой турбины, который, смешиваясь с пирогазом, поступающим в концевые уплотнения из проточной части компрессора, образует твердые отложения, нарушающие работоспособность концевых уплотнений.

На рисунке 12 показана схема с подводом пара к концевым лабиринтным уплотнениям корпусов компрессора.



Стрелками показано направление движения потоков из участков уплотнения; красным цветом обозначен пар, желтым цветом обозначен пирогаз

Рисунок 12 – Схема старой системы лабиринтных уплотнений компрессора

3.3 Описание модернизированной системы концевых лабиринтных уплотнений

Модернизация системы концевых лабиринтных уплотнений подразумевает изготовление новых обойм с проточками под введение буферного и затворного газа, а также оптимизацию участков гребней на роторе в соответствии с новыми проточками на статорных обоймах. Новые обоймы изготовлены из стали 20 ГОСТ 1050-2013. На рисунке 13 изображен эскиз уплотнения.

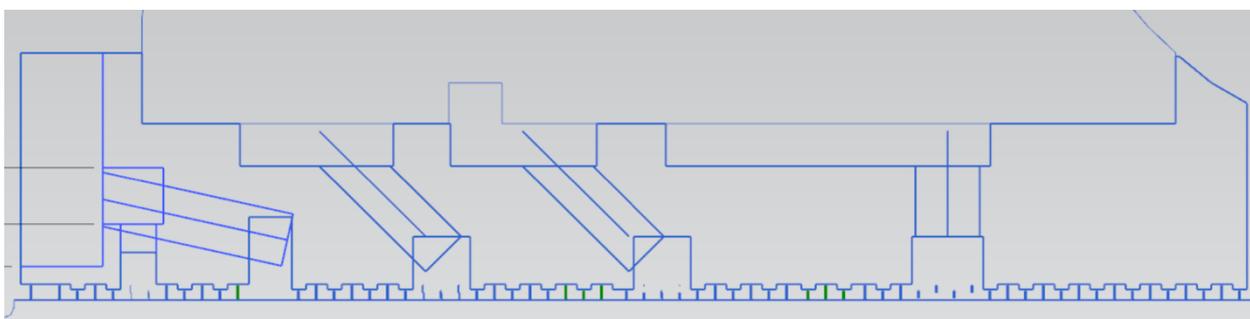


Рисунок 13 – Эскиз нового уплотнения

На рисунке 14 изображена принципиальная схема системы подведения буферного и затворного газа в обоймы цилиндра высокого давления (ЦВД).

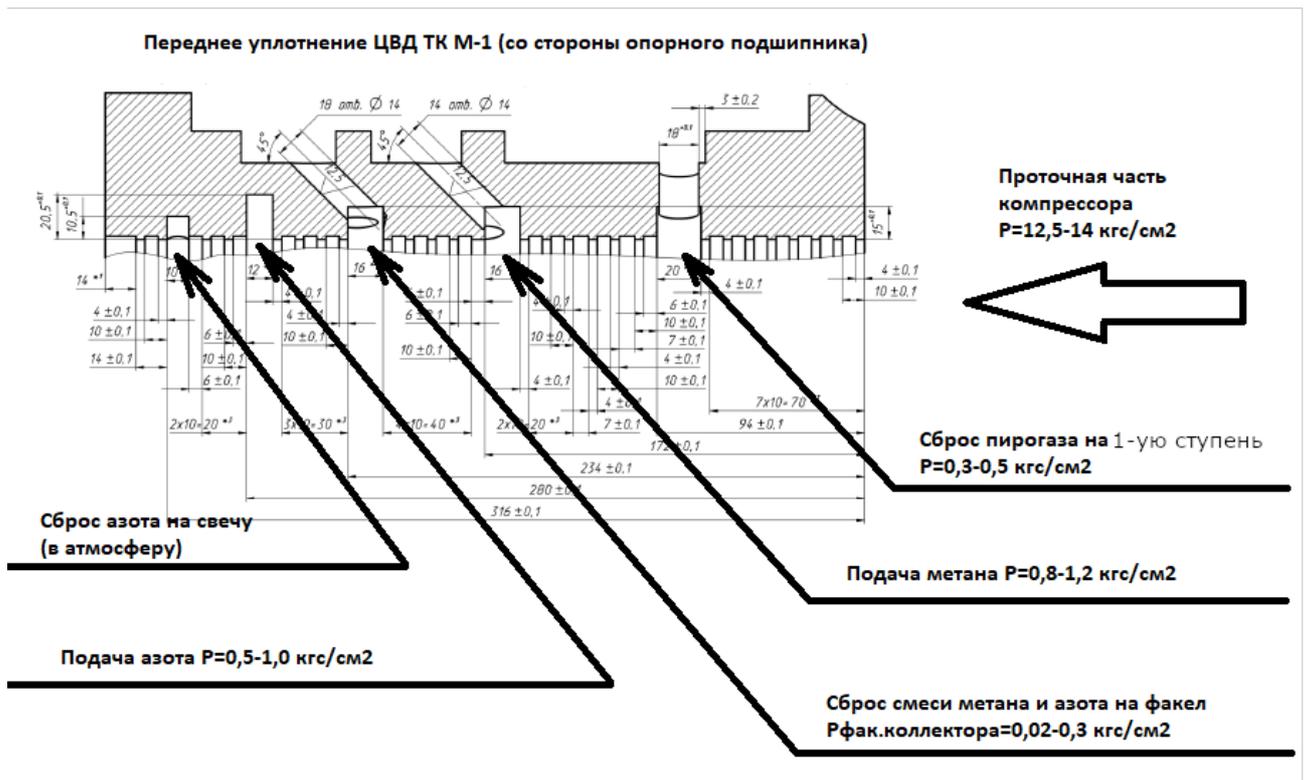


Рисунок 14 – Подведение и отведение потоков в новых обоймах

Пирогаз с проточной части компрессора проходит лабиринтный участок из 15 дросселей, образованными выступами статорной обоймы и короткими и длинными гребнями ротора, после чего попадает в коллектор, соединенный со всасом корпуса ЦНД. Излишки пирогаза направляются ко второму участку лабиринтного уплотнения, состоящего из 12 дросселей, на этом участке пирогаз запирается буферным газом – метаном, давление которого на $0,5-0,6 \text{ кгс/см}^2$ выше давления коллектора всаса первой ступени, и их смесь также попадает в коллектор первой ступени корпуса низкого давления. Излишки метана проходят участок уплотнения с 10 дросселями. Для недопущения попадания метана в машинный зал существует барьерный газ – азот. Азот подается под давлением на $0,5-0,6 \text{ кгс/см}^2$ выше давления факельного коллектора сброса метана. Для запираания метана азот проходит через лабиринтный участок с 7 дросселями. Излишки азота, проходя через участок уплотнения с 5 дросселями, направляются в свечной коллектор. Для снижения утечек азота в машинный зал предусмотрен последний участок

лабиринтного уплотнения с 5 дросселями. На рисунке 15 представлена схема обвязки лабиринтных уплотнений на примере корпуса ЦВД.

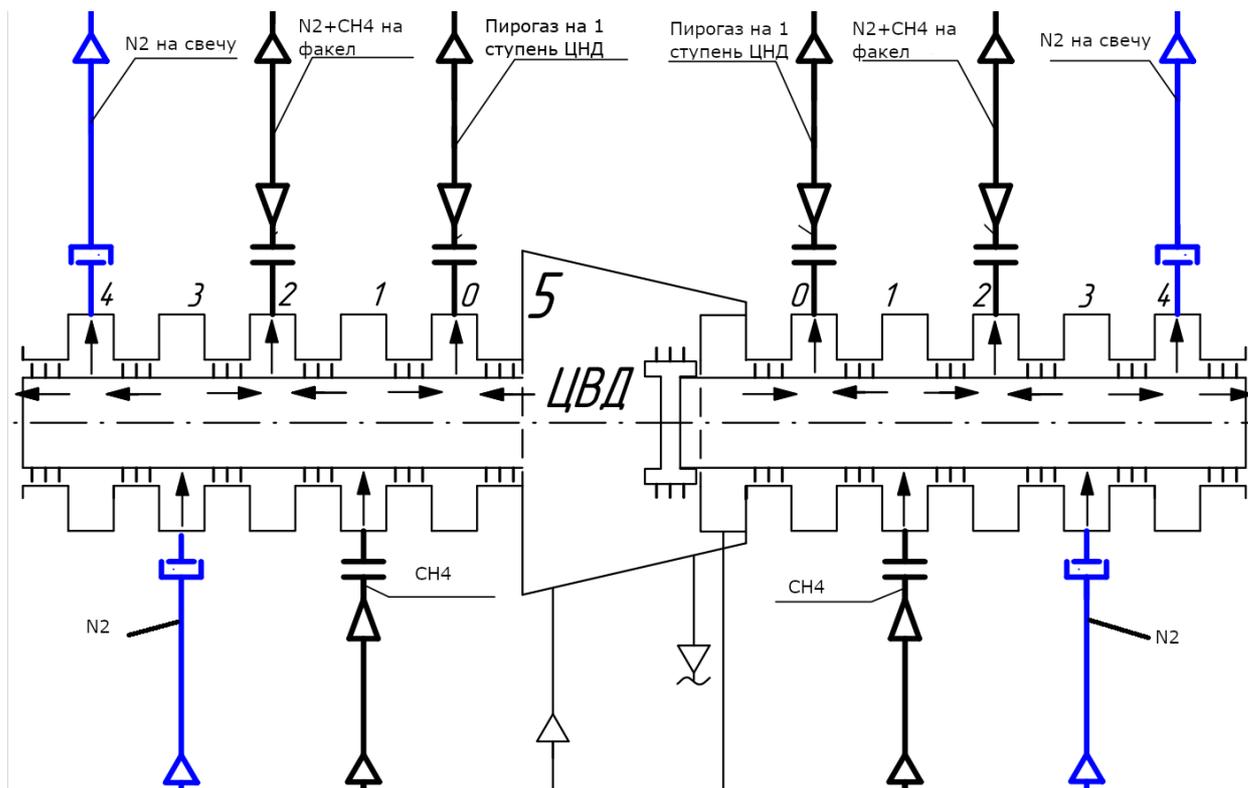


Рисунок 15 – Схема обвязки концевых лабиринтных уплотнений корпуса ЦВД

Для исключения образования загрязнений в проточной части уплотнения используется буферный газ метан. Регулирование давления подачи метана и азота осуществляется автоматически дросселированием газа за счет изменения положения регулирующей арматуры на входе газов.

4 Аналитический расчет величины протечек газа через участки лабиринтного уплотнения

4.1 Методика расчета

Изложенная методика оценки основных параметров лабиринтного уплотнения и расчета величины протечек через уплотнение опирается на РТМ 108.020.33-86 «Уплотнения лабиринтные стационарных паровых и газовых турбин и компрессоров. Проектирование и расчет».

Величина радиального зазора принимается согласно техническому заданию. Расчет производился для радиальных зазоров $\delta_r = 0,35$ мм и $\delta_r = 0,5$ мм.

4.2 Расчет параметров рабочего газа

Параметры газа в цилиндре среднего давления (ЦСД)

Состав рабочего газа представлен в таблице А.1 приложения А.

Рассчитанные ниже параметры будут использоваться в дальнейших расчетах протечек рабочего газа на первую ступень центробежного компрессора.

Рабочий газ в ЦСД представляет собой многокомпонентную смесь со следующими характеристиками:

молярная масса смеси $\mu_{см}$:

$$\mu_{см} = \frac{100}{\sum_{i=1}^{25} \frac{g_i}{\mu_i}} = 26,8 \text{ г/моль} \quad (1)$$

газовая постоянная смеси R :

$$R = \frac{8314}{\mu_{см}} = \frac{8314}{26,8} = 310,2 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{К}} \quad (2)$$

абсолютное давление рабочего газа p_0 :

$$p_0 = p_{атм} + p_{изб} = 101325 + 1,3 \cdot 98100 = 228855 \text{ Па} \quad (3)$$

плотность газа при заданных температуре и давлении ρ :

$$\rho = \frac{p_0}{R \cdot (t_r + 273,15)} = \frac{228855}{310,2 \cdot (40 + 273,15)} = 2,356 \text{ кг/м}^3 \quad (4)$$

удельный объем газа при заданных температуре и давлении v_0 :

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{2,356} = 0,424 \text{ м}^3/\text{кг} \quad (5)$$

Параметры газа в цилиндре высокого давления (ЦВД)

Рабочий газ в ЦВД представляет собой многокомпонентную смесь со следующими характеристиками:

молярная масса смеси:

$$\mu_{\text{см}} = \frac{100}{\sum_{i=1}^{25} \frac{g_i}{\mu_i}} = 25,8 \text{ г/моль} \quad (6)$$

газовая постоянная смеси:

$$R = \frac{8314}{\mu_{\text{см}}} = \frac{8314}{26,8} = 321,5 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{К}} \quad (7)$$

абсолютное давление рабочего газа:

$$p_0 = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}} = 101325 + 12,7 \cdot 98100 = 1347195 \text{ Па} \quad (8)$$

плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho = \frac{p_0}{R \cdot (t_r + 273,15)} = \frac{1347195}{321,5 \cdot (40 + 273,15)} = 13,381 \text{ кг/м}^3 \quad (9)$$

удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{13,381} = 0,075 \text{ м}^3/\text{кг} \quad (10)$$

4.3 Расчет параметров уплотнения цилиндра среднего давления (ЦСД)

Параметры концевого уплотнения при радиальном зазоре $\delta_r = 0,35$ мм

Концевые лабиринтные уплотнения турбокомпрессора представлены в виде ступенчатых уплотнений с чередующимися короткими и длинными гребнями на роторе. Уплотнение формируется из зачеканенных в роторе коротких и длинных гребней и съемной статорной обоймы.

Исходные данные:

радиальный зазор в концевом уплотнении $\delta_r = 0,35$ мм;

ширина гребней $b = 0,3$ мм;

шаг гребней $t = 5$ мм;

диаметр вала в области уплотнения $d_B = 220$ мм;

наибольший диаметр образующей лабиринта обоймы статора $d_G = 229$ мм;

наименьший диаметр образующей лабиринта обоймы статора $d_M = 226$ мм;

угол наклона гребней $\theta_0 = 90$ градусов.

Радиус скругления гребней будет довольно мал, поэтому есть смысл в расчетах им пренебречь:

$$r \cong 0;$$

Камера расширения сформирована из поверхности вала и наибольшей образующей лабиринта обоймы статора, поэтому ее высота будет равна:

$$H = \frac{d_G - d_B}{2} = \frac{229 - 220}{2} = 4,5 \text{ мм} \quad (11)$$

Глубина камеры H часто включает и величину зазора. В уплотнениях с радиальными зазорами глубина промежуточной лабиринтной камеры равна сумме зазора и высоты гребня (для уплотнений с большими и малыми гребнями в формуле используется высота длинных гребней):

$$H = h_d + \delta_r \quad (12)$$

Найдем высоту длинных гребней:

$$h_G = H - \delta_r = 4,5 - 0,35 = 4,15 \text{ мм} \quad (13)$$

Отрыв струи от гребня происходит в точке перехода от прямолинейной части профиля к закруглению (радиуса r). Для затупленных кромок гребня расчетный зазор принимается равным фактическому:

$$\delta_0 = \delta_r = 0,35 \text{ мм} \quad (14)$$

Воспользовавшись табличным значением зависимости коэффициента сужения струи μ от угла наклона гребня [1, черт. 19], получаем, что при $\theta_0 = 90$:

$$\mu_0 = 0,6$$

Расчетная длина струи равна:

$$l = t + h_G = 5 + 4,15 = 9,15 \text{ мм} \quad (15)$$

В камере уплотнения возможны четыре характерных режима истечения струи: канальный, струйный, диффузорный и срывной. Для имеющегося типа уплотнения наиболее вероятным режимом истечения является струйный, так как шаг гребней относительно небольшой, то струя не успеет полностью заполнить камеру по глубине. Проверка условия будет выглядеть так:

$$0,24l + \mu_0 \delta_0 < H \quad (16)$$

$$0,24 \cdot 9,15 + 0,6 \cdot 0,35 < 4,5$$

$$2,4 < 4,5$$

Условие выполняется, значит струя имеет свободное истечение в камере.

Коэффициент расхода для ступенчатых уплотнений при наличии в камере свободной струи при умеренном скруглении гребня ($r < 0,6$) по эмпирической формуле можно найти так:

$$\alpha_0 \approx \left[1 + \sin \frac{\theta_0}{2} + 3 \sqrt{\frac{\delta_0}{l}} \left(\sin \frac{\theta_0}{2} \right)^3 \right]^{-1} = \left[1 + \sin \frac{90}{2} + 3 \sqrt{\frac{0,35}{9,15}} \left(\sin \frac{90}{2} \right)^3 \right]^{-1} =$$

$$= 0,522 \quad (17)$$

Поправка на малое число дросселей при одинаковых коэффициентах расхода:

$$\xi = 1$$

Для выбора коэффициента поправки на толщину кромки гребня найдем отношение толщины гребня к величине расчетного радиального зазора:

$$\frac{b}{\delta_0} = \frac{0,3}{0,35} = 0,85 \quad (18)$$

Определим по графику [1, черт. 18] поправку на толщину кромки гребня:

$$\beta \cong 1,08$$

Проверим условие на внезапное расширение струи, в результате которого может увеличиться протечка:

$$b > 4(\delta_r - \mu_0 \delta_0) \quad (19)$$

$$0,3 > 4(0,35 - 0,6 \cdot 0,35)$$

$$0,3 \not> 0,56$$

Расчет протечки азота на свечу

Азот является барьерным газом, т. е. запирает тот же буферный газ (метан). Согласно модернизированной схеме сдерживать утечки азота в машинный зал будет участок лабиринтного уплотнения с пятью дросселями.

Исходные данные:

температура подаваемого газа $t_r = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;

плотность газа при нормальных условиях $\rho_{н.у.} = 1,25 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

избыточное давление газа $p_{изб} = 1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

избыточное давление коллектора свечи $p_{изб.св} = 0,02 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

число дросселей $z = 5$;

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = p_{атм} + p_{изб} = 101325 + 1 \cdot 98100 = 199425 \text{ Па} \quad (20)$$

Критическое давление газа:

$$p_{кр} = \frac{0,65p_0}{\sqrt{z + 0,5}} = \frac{0,65 \cdot 199425}{\sqrt{5 + 0,5}} = 55273 \text{ Па} \quad (21)$$

Абсолютное давление коллектора свечи:

$$p_{абс.св} = p_{атм} + p_{изб.св} = 101325 + 0,02 \cdot 98100 = 103287 \text{ Па} \quad (22)$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{абс.св} > p_{кр} \quad (23)$$

$$103287 > 55273$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{абс.св} = 103287 \text{ Па.}$$

Плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho = \rho_{н.у.} \cdot \frac{273,15}{t_r + 273,15} \cdot \frac{p_0}{p_{атм}} = 1,25 \cdot \frac{273,15}{20 + 273,15} \cdot \frac{199425}{101325} = 2,292 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (24)$$

Удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{2,292} = 0,436 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \quad (25)$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$\begin{aligned} G &= \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}} \\ &= 0,522 \cdot 1,08 \cdot 0,00035 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,227 \cdot \sqrt{\frac{199425^2 - 103287^2}{5 \cdot 199425 \cdot 0,436}} \\ &= 0,054 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (26) \end{aligned}$$

Расход азота на свечу:

$$V_1 = \frac{3600G}{\rho_{\text{н.у}}} = \frac{3600 \cdot 0,054}{1,25} = 156,4 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}} \quad (27)$$

Расчет протечки азота на факел

При движении в сторону проточной части ЦСД азот пройдет через 9 дросселей, поэтому

$$z = 9.$$

Критическое давление газа:

$$p_{\text{кр}} = \frac{0,65p_0}{\sqrt{z + 0,5}} = \frac{0,65 \cdot 199425}{\sqrt{9 + 0,5}} = 42056 \text{ Па}$$

Абсолютное давление коллектора свечи:

$$p_{\text{абс.св}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб.св}} = 101325 + 0,02 \cdot 98100 = 103287 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{\text{абс.св}} > p_{\text{кр}}$$

$$103287 > 42056$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.св}} = 103287 \text{ Па}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$G = \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}}$$

$$= 0,522 \cdot 1,08 \cdot 0,00035 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,227 \cdot \sqrt{\frac{199425^2 - 103287^2}{9 \cdot 199425 \cdot 0,436}}$$

$$= 0,04 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Расход азота на факел:

$$V_2 = \frac{3600G}{\rho_{н.у}} = \frac{3600 \cdot 0,04}{1,25} = 116,6 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки азота в машинный зал

При движении в сторону машинного зала азот пройдет последние 5 дросселей:

$$z = 5.$$

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = p_{св} = 103287 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{кр} = \frac{0,65 p_0}{\sqrt{z + 0,5}} = \frac{0,65 \cdot 103287}{\sqrt{5 + 0,5}} = 28627 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{атм} > p_{кр}$$

$$101325 > 28627$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{абс.св} = 101325 \text{ Па}$$

Плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho = \rho_{н.у} \cdot \frac{273,15}{t_{г} + 273,15} \cdot \frac{p_0}{p_{атм}} = 1,25 \cdot \frac{273,15}{20 + 273,15} \cdot \frac{103287}{101325} = 1,187 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,187} = 0,842 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$G = \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 \nu_0}}$$
$$= 0,522 \cdot 1,08 \cdot 0,00035 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,227 \cdot \sqrt{\frac{103287^2 - 101325^2}{5 \cdot 103287 \cdot 0,842}}$$
$$= 0,006 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Расход азота в машинный зал:

$$V_3 = \frac{3600G}{\rho_{н.у}} = \frac{3600 \cdot 0,006}{1,25} = 18,4 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Общий расход азота для системы уплотнений ЦСД

$$V_4 = V_1 + V_2 = 156,4 + 116,6 = 273 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки метана на факел

Исходные данные:

температура подаваемого газа $t_r = 10 \text{ }^\circ\text{C}$;

плотность газа при нормальных условиях $\rho_{н.у.} = 0,72 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

избыточное давление газа $p_{изб} = 1,2 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

избыточное давление факельного коллектора $p_{изб.фак} = 0,02 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

При движении в сторону факельного сброса метан пройдет через 11 дросселей, поэтому

$$z = 11.$$

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = p_{атм} + p_{изб} = 101325 + 1,2 \cdot 98100 = 219045 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{кр} = \frac{0,85 p_0}{\sqrt{z + 1,5}} = \frac{0,85 \cdot 219045}{\sqrt{11 + 1,5}} = 52662 \text{ Па}$$

Абсолютное давление коллектора свечи:

$$p_{абс.фак} = p_{атм} + p_{изб.фак} = 101325 + 0,02 \cdot 98100 = 103287 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа,
а так как

$$p_{\text{абс.фак}} > p_{\text{кр}}$$
$$103287 > 52662$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.фак}} = 103287 \text{ Па}$$

Плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho = \rho_{\text{н.у}} \cdot \frac{273,15}{t_{\text{г}} + 273,15} \cdot \frac{p_0}{p_{\text{атм}}} = 0,72 \cdot \frac{273,15}{10 + 273,15} \cdot \frac{219045}{101325} = 1,501 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,501} = 0,666 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$G = \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}}$$
$$= 0,522 \cdot 1,08 \cdot 0,00035 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,227 \cdot \sqrt{\frac{219045^2 - 103287^2}{11 \cdot 219045 \cdot 0,666}}$$
$$= 0,032 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Расход метана на факел:

$$V_5 = \frac{3600G}{\rho_{\text{н.у}}} = \frac{3600 \cdot 0,032}{0,72} = 160,1 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки метана на первую ступень ЦНД

При движении в сторону сброса смеси пирогаза и метана на первую ступень ЦНД метан пройдет 10 дросселей:

$$z = 10.$$

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = 219045 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{кр} = \frac{0,85p_0}{\sqrt{z + 1,5}} = \frac{0,85 \cdot 219045}{\sqrt{10 + 1,5}} = 54904 \text{ Па}$$

Избыточное давление коллектора сброса на первую ступень ЦНД:

$$p_{изб.ЦНД} = 0,3 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

Абсолютное давление коллектора сброса на первую ступень ЦНД:

$$p_{абс.ЦНД} = p_{атм} + p_{изб.ЦНД} = 101325 + 0,3 \cdot 98100 = 130755 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{абс.ЦНД} > p_{кр}$$

$$130755 > 54904$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{абс.ЦНД} = 130755 \text{ Па}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$G = \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}}$$

$$= 0,522 \cdot 1,08 \cdot 0,00035 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,227 \cdot \sqrt{\frac{219045^2 - 130755^2}{10 \cdot 219045 \cdot 0,666}}$$

$$= 0,031 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Расход метана на первую ступень ЦНД:

$$V_6 = \frac{3600G}{\rho_{н.у}} = \frac{3600 \cdot 0,031}{0,72} = 152,8 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расход смеси азота и метана в факельный коллектор

$$V_7 = V_2 + V_5 = 116,6 + 160,1 = 276,7 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки пирогаза на первую ступень ЦНД

Исходные данные:

плотность газа при заданных температуре и давлении $\rho = 2,559 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

температура газа $t_r = 40 \text{ }^\circ\text{C}$;

избыточное давление газа $p_{\text{изб}} = 1,5 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

Избыточное давление коллектора сброса на первую ступень ЦНД:

$$p_{\text{изб.ЦНД}} = 0,3 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2};$$

При движении в сторону сброса на первую ступень ЦНД пирогаз пройдет 14 дросселей:

$$z = 14.$$

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}} = 101325 + 1,5 \cdot 98100 = 248475 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{\text{кр}} = \frac{0,85p_0}{\sqrt{z + 1,5}} = \frac{0,85 \cdot 248475}{\sqrt{14 + 1,5}} = 53646 \text{ Па}$$

Абсолютное давление коллектора свечи:

$$p_{\text{абс.фак}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб.фак}} = 101325 + 0,3 \cdot 98100 = 130755 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{\text{абс.ЦНД}} > p_{\text{кр}}$$

$$130755 > 53646$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.фак}} = 130755 \text{ Па}$$

Плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho_{\text{н.у}} = \rho \cdot \frac{t_{\text{г}} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_{\text{атм}}}{p_0} = 2,559 \cdot \frac{40 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101325}{248475} = 1,196 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{2,559} = 0,39 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$\begin{aligned}
 G &= \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}} \\
 &= 0,522 \cdot 1,08 \cdot 0,00035 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,227 \cdot \sqrt{\frac{248475^2 - 130755^2}{14 \cdot 248475 \cdot 0,39}} \\
 &= 0,038 \frac{\text{кг}}{\text{с}}
 \end{aligned}$$

Расход пирогаза на первую ступень ЦНД:

$$V_5 = \frac{3600G}{\rho_{н.у}} = \frac{3600 \cdot 0,038}{1,196} = 114,5 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Параметры концевого уплотнения при радиальном зазоре $\delta_r = 0,5$ мм

Исходные данные:

радиальный зазор в концевом уплотнении $\delta_r = 0,5$ мм;

ширина гребней $b = 0,3$ мм;

шаг гребней $t = 5$ мм;

диаметр вала в области уплотнения $d_B = 220$ мм;

наибольший диаметр образующей лабиринта обоймы статора $d_6 = 229$ мм;

наименьший диаметр образующей лабиринта обоймы статора $d_M = 226$ мм;

угол наклона гребней $\theta_0 = 90$ градусов.

Радиус скругления гребней будет довольно мал, поэтому есть смысл в расчетах им пренебречь:

$$r \cong 0;$$

Камера расширения сформирована из поверхности вала и наибольшей образующей лабиринта обоймы статора, поэтому ее высота будет равна:

$$H = \frac{d_6 - d_B}{2} = \frac{229 - 220}{2} = 4,5 \text{ мм}$$

Глубина камеры H часто включает и величину зазора. В уплотнениях с радиальными зазорами глубина промежуточной лабиринтной камеры равна

сумме зазора и высоты гребня (для уплотнений с большими и малыми гребнями в формуле используется высота длинных гребней):

$$H = h_d + \delta_r$$

Найдем высоту длинных гребней:

$$h_g = H - \delta_r = 4,5 - 0,5 = 4 \text{ мм}$$

Для затупленных кромок гребня расчетный зазор принимается равным фактическому:

$$\delta_0 = \delta_r = 0,5 \text{ мм}$$

Воспользовавшись табличным значением зависимости коэффициента сужения струи μ от угла наклона гребня [1, черт. 19], получаем, что при $\theta_0 = 90$:

$$\mu_0 = 0,6$$

Расчетная длина струи равна:

$$l = t + h_g = 5 + 4 = 9 \text{ мм}$$

Проверка условия будет выглядеть так:

$$0,24l + \mu_0 \delta_0 < H$$

$$0,24 \cdot 9 + 0,6 \cdot 0,5 < 4,5$$

$$2,46 < 4,5$$

Условие выполняется, значит струя имеет свободное истечение в камере.

Коэффициент расхода для ступенчатых уплотнений при наличии в камере свободной струи при умеренном скруглении гребня ($r < 0,6$) по эмпирической формуле можно найти так:

$$\alpha_0 \approx \left[1 + \sin \frac{\theta_0}{2} + 3 \sqrt{\frac{\delta_0}{l}} \left(\sin \frac{\theta_0}{2} \right)^3 \right]^{-1} = \left[1 + \sin \frac{90}{2} + 3 \sqrt{\frac{0,5}{9}} \left(\sin \frac{90}{2} \right)^3 \right]^{-1}$$

$$= 0,511$$

Поправка на малое число дросселей при одинаковых коэффициентах расхода:

$$\xi = 1;$$

Для выбора коэффициента поправки на толщину кромки гребня найдем отношение толщины гребня к величине расчетного радиального зазора:

$$\frac{b}{\delta_0} = \frac{0,3}{0,5} = 0,6$$

Определим по графику [1, черт. 18] поправку на толщину кромки гребня:

$$\beta \cong 1,05;$$

Проверим условие на внезапное расширение струи, в результате которого может увеличиться протечка:

$$\begin{aligned} b &> 4(\delta_r - \mu_0 \delta_0) \\ 0,3 &> 4(0,5 - 0,6 \cdot 0,5) \\ 0,3 &\ngtr 0,8 \end{aligned}$$

Расчет протечки азота на свечу

Исходные данные:

температура подаваемого газа $t_r = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;

плотность газа при нормальных условиях $\rho_{н.у.} = 1,25 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

избыточное давление газа $p_{изб} = 0,5 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

избыточное давление коллектора свечи $p_{изб.св} = 0,04 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

число дросселей $z = 5$;

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = p_{атм} + p_{изб} = 101325 + 0,5 \cdot 98100 = 150375 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{кр} = \frac{0,65 p_0}{\sqrt{z + 0,5}} = \frac{0,65 \cdot 150375}{\sqrt{5 + 0,5}} = 41678 \text{ Па}$$

Абсолютное давление коллектора свечи:

$$p_{абс.св} = p_{атм} + p_{изб.св} = 101325 + 0,04 \cdot 98100 = 105249 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{абс.св} > p_{кр}$$

$$105249 > 41678$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.св}} = 105249 \text{ Па}$$

Плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho = \rho_{\text{н.у}} \cdot \frac{273,15}{t_{\Gamma} + 273,15} \cdot \frac{p_0}{p_{\text{атм}}} = 1,25 \cdot \frac{273,15}{20 + 273,15} \cdot \frac{150375}{101325} = 1,728 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,728} = 0,578 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$\begin{aligned} G &= \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}} \\ &= 0,511 \cdot 1,05 \cdot 0,0005 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,227 \cdot \sqrt{\frac{150375^2 - 105249^2}{5 \cdot 150375 \cdot 0,578}} \\ &= 0,038 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Расход азота на свечу:

$$V_1 = \frac{3600G}{\rho_{\text{н.у}}} = \frac{3600 \cdot 0,038}{1,25} = 109,1 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки азота на факел

При движении в сторону проточной части ЦСД азот пройдет через 9 дросселей, поэтому

$$z = 9.$$

Критическое давление газа:

$$p_{\text{кр}} = \frac{0,65 p_0}{\sqrt{z + 0,5}} = \frac{0,65 \cdot 150375}{\sqrt{9 + 0,5}} = 31712 \text{ Па}$$

Абсолютное давление коллектора свечи:

$$p_{\text{абс.св}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб.св}} = 101325 + 0,05 \cdot 98100 = 106230 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{\text{абс.св}} > p_{\text{кр}}$$

$$106230 > 31712$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.св}} = 106230 \text{ Па}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$\begin{aligned} G &= \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}} \\ &= 0,511 \cdot 1,05 \cdot 0,0005 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,227 \cdot \sqrt{\frac{150375^2 - 106230^2}{9 \cdot 150375 \cdot 0,578}} \\ &= 0,028 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Расход азота на факел:

$$V_2 = \frac{3600G}{\rho_{\text{н.у}}} = \frac{3600 \cdot 0,028}{1,25} = 80,6 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки азота в машинный зал

При движении в сторону машинного зала азот пройдет последние 5 дросселей:

$$z = 5.$$

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = p_{\text{св}} = 105249 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{\text{кр}} = \frac{0,65 p_0}{\sqrt{z + 0,5}} = \frac{0,65 \cdot 105249}{\sqrt{5 + 0,5}} = 29171 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{\text{атм}} > p_{\text{кр}}$$

$$101325 > 29171$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.св}} = 101325 \text{ Па}$$

Плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho = \rho_{\text{н.у.}} \cdot \frac{273,15}{t_{\text{г}} + 273,15} \cdot \frac{p_0}{p_{\text{атм}}} = 1,25 \cdot \frac{273,15}{20 + 273,15} \cdot \frac{105249}{101325} = 1,209 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,209} = 0,827 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$\begin{aligned} G &= \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}} \\ &= 0,511 \cdot 1,05 \cdot 0,0005 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,227 \cdot \sqrt{\frac{105249^2 - 101325^2}{5 \cdot 105249 \cdot 0,827}} \\ &= 0,011 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Расход азота в машинный зал:

$$V_3 = \frac{3600G}{\rho_{\text{н.у.}}} = \frac{3600 \cdot 0,011}{1,25} = 32,4 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Общий расход азота для системы уплотнений ЦСД

$$V_4 = V_1 + V_2 = 109,1 + 80,6 = 189,7 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки метана на факел

Исходные данные:

температура подаваемого газа $t_{\text{г}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$;

плотность газа при нормальных условиях $\rho_{\text{н.у.}} = 0,72 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

избыточное давление газа $p_{\text{изб}} = 0,8 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

избыточное давление факельного коллектора $p_{\text{изб.фак}} = 0,05 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

При движении в сторону факельного сброса метан пройдет через 11 дросселей, поэтому

$$z = 11.$$

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}} = 101325 + 0,8 \cdot 98100 = 179805 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{кр} = \frac{0,85p_0}{\sqrt{z + 1,5}} = \frac{0,85 \cdot 179805}{\sqrt{11 + 1,5}} = 43228 \text{ Па}$$

Абсолютное давление коллектора свечи:

$$p_{абс.фак} = p_{атм} + p_{изб.фак} = 101325 + 0,05 \cdot 98100 = 106230 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{абс.фак} > p_{кр} \\ 106230 > 43228$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{абс.фак} = 106230 \text{ Па}$$

Плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho = \rho_{н.у} \cdot \frac{273,15}{t_T + 273,15} \cdot \frac{p_0}{p_{атм}} = 0,72 \cdot \frac{273,15}{10 + 273,15} \cdot \frac{179805}{101325} = 1,232 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,232} = 0,811 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$G = \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}} \\ = 0,511 \cdot 1,05 \cdot 0,0005 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,227 \cdot \sqrt{\frac{179805^2 - 106230^2}{11 \cdot 179805 \cdot 0,811}} \\ = 0,027 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Расход метана на факел:

$$V_5 = \frac{3600G}{\rho_{н.у}} = \frac{3600 \cdot 0,027}{0,72} = 133,2 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки метана на первую ступень ЦНД

При движении в сторону сброса смеси пирогаза и метана на первую ступень ЦНД метан пройдет 10 дросселей:

$$z = 10.$$

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = 179805 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{\text{кр}} = \frac{0,85p_0}{\sqrt{z + 1,5}} = \frac{0,85 \cdot 179805}{\sqrt{10 + 1,5}} = 45068 \text{ Па}$$

Избыточное давление коллектора сброса на первую ступень ЦНД:

$$p_{\text{изб.ЦНД}} = 0,3 \frac{\text{КГС}}{\text{см}^2}$$

Абсолютное давление коллектора сброса на первую ступень ЦНД:

$$p_{\text{абс.ЦНД}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб.ЦНД}} = 101325 + 0,3 \cdot 98100 = 130755 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа,
а так как

$$p_{\text{абс.ЦНД}} > p_{\text{кр}}$$

$$130755 > 45068$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.ЦНД}} = 130755 \text{ Па}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$\begin{aligned} G &= \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}} \\ &= 0,511 \cdot 1,05 \cdot 0,0005 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,227 \cdot \sqrt{\frac{179805^2 - 130755^2}{10 \cdot 179805 \cdot 0,811}} \\ &= 0,024 \frac{\text{КГ}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Расход метана на первую ступень ЦНД:

$$V_6 = \frac{3600G}{\rho_{\text{н.у}}} = \frac{3600 \cdot 0,024}{0,72} = 118,9 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расход смеси азота и метана в факельный коллектор

$$V_7 = V_2 + V_5 = 133,2 + 118,9 = 252,1 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки пирогаза на первую ступень ЦНД

Исходные данные:

плотность газа при заданных температуре и давлении $\rho = 2,357 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

температура газа $t_{\Gamma} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

избыточное давление газа $p_{\text{изб}} = 1,3 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

Избыточное давление коллектора сброса на первую ступень ЦНД:

$$p_{\text{изб.ЦНД}} = 0,3 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2};$$

При движении в сторону сброса на первую ступень ЦНД пирогаз пройдет 14 дросселей:

$$z = 14.$$

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}} = 101325 + 1,3 \cdot 98100 = 228855 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{\text{кр}} = \frac{0,85p_0}{\sqrt{z + 1,5}} = \frac{0,85 \cdot 228855}{\sqrt{14 + 1,5}} = 49410 \text{ Па}$$

Абсолютное давление факельного коллектора:

$$p_{\text{абс.фак}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб.фак}} = 101325 + 0,3 \cdot 98100 = 130755 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{\text{абс.ЦНД}} > p_{\text{кр}}$$

$$130755 > 49410$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.фак}} = 130755 \text{ Па}$$

Плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho_{\text{н.у}} = \rho \cdot \frac{t_{\Gamma} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_{\text{атм}}}{p_0} = 2,357 \cdot \frac{40 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101325}{228855} = 1,196 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{2,357} = 0,424 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$\begin{aligned} G &= \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}} \\ &= 0,511 \cdot 1,05 \cdot 0,0005 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,227 \cdot \sqrt{\frac{228855^2 - 130755^2}{14 \cdot 228855 \cdot 0,424}} \\ &= 0,037 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Расход пирогаза на первую ступень ЦНД:

$$V_5 = \frac{3600G}{\rho_{н.у}} = \frac{3600 \cdot 0,037}{1,196} = 112,8 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

4.4 Расчет параметров уплотнения цилиндра высокого давления (ЦВД)

Параметры концевое уплотнения при радиальном зазоре $\delta_r = 0,35$ мм

Исходные данные:

радиальный зазор в концевом уплотнении $\delta_r = 0,35$ мм;

ширина гребней $b = 0,3$ мм;

шаг гребней $t = 5$ мм;

диаметр вала в области уплотнения $d_B = 200$ мм;

наибольший диаметр образующей лабиринта обоймы статора $d_6 = 209$ мм;

наименьший диаметр образующей лабиринта обоймы статора $d_M = 206$ мм;

угол наклона гребней $\theta_0 = 90$ градусов.

Радиус скругления гребней будет довольно мал, поэтому есть смысл в расчетах им пренебречь:

$$r \cong 0;$$

Камера расширения сформирована из поверхности вала и наибольшей образующей лабиринта обоймы статора, поэтому ее высота будет равна:

$$H = \frac{d_6 - d_B}{2} = \frac{209 - 200}{2} = 4,5 \text{ мм}$$

Глубина камеры H :

$$H = h_d + \delta_r$$

Найдем высоту длинных гребней:

$$h_6 = H - \delta_r = 4,5 - 0,35 = 4,15 \text{ мм}$$

Для затупленных кромок гребня расчетный зазор принимается равным фактическому:

$$\delta_0 = \delta_r = 0,35 \text{ мм}$$

Воспользовавшись табличным значением зависимости коэффициента сужения струи μ от угла наклона гребня [1, черт. 19], получаем, что при $\theta_0 = 90$:

$$\mu_0 = 0,6;$$

Расчетная длина струи равна:

$$l = t + h_6 = 5 + 4,15 = 9,15 \text{ мм}$$

Проверка условия будет выглядеть так:

$$0,24l + \mu_0\delta_0 < H$$

$$0,24 \cdot 9,15 + 0,6 \cdot 0,35 < 4,5$$

$$2,4 < 4,5$$

Условие выполняется, значит струя имеет свободное истечение в камере.

Коэффициент расхода для ступенчатых уплотнений при наличии в камере свободной струи при умеренном скруглении гребня ($r < 0,6$):

$$\alpha_0 \approx \left[1 + \sin \frac{\theta_0}{2} + 3 \sqrt{\frac{\delta_0}{l}} \left(\sin \frac{\theta_0}{2} \right)^3 \right]^{-1} = \left[1 + \sin \frac{90}{2} + 3 \sqrt{\frac{0,35}{9,15}} \left(\sin \frac{90}{2} \right)^3 \right]^{-1} =$$

$$= 0,522$$

Поправка на малое число дросселей при одинаковых коэффициентах расхода:

$$\xi = 1;$$

Для выбора коэффициента поправки на толщину кромки гребня найдем отношение толщины гребня к величине расчетного радиального зазора:

$$\frac{b}{\delta_0} = \frac{0,3}{0,35} = 0,85$$

Определим по графику [1, черт. 18] поправку на толщину кромки гребня:

$$\beta \cong 1,08;$$

Проверим условие на внезапное расширение струи, в результате которого может увеличиться протечка:

$$\begin{aligned} b &> 4(\delta_r - \mu_0 \delta_0) \\ 0,3 &> 4(0,35 - 0,6 \cdot 0,35) \\ 0,3 &\ngtr 0,56 \end{aligned}$$

Расчет протечки азота на свечу

Исходные данные:

температура подаваемого газа $t_r = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;

плотность газа при нормальных условиях $\rho_{н.у.} = 1,25 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

избыточное давление газа $p_{изб} = 1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

избыточное давление коллектора свечи $p_{изб.св} = 0,02 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

число дросселей $z = 5$;

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = p_{атм} + p_{изб} = 101325 + 1 \cdot 98100 = 199425 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{кр} = \frac{0,65 p_0}{\sqrt{z + 0,5}} = \frac{0,65 \cdot 199425}{\sqrt{5 + 0,5}} = 55273 \text{ Па}$$

Абсолютное давление коллектора свечи:

$$p_{абс.св} = p_{атм} + p_{изб.св} = 101325 + 0,02 \cdot 98100 = 103287 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{абс.св} > p_{кр}$$

$$103287 > 55273$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.св}} = 103287 \text{ Па}$$

Плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho = \rho_{\text{н.у}} \cdot \frac{273,15}{t_{\text{г}} + 273,15} \cdot \frac{p_0}{p_{\text{атм}}} = 1,25 \cdot \frac{273,15}{20 + 273,15} \cdot \frac{199425}{101325} = 2,292 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{2,292} = 0,436 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$\begin{aligned} G &= \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}} \\ &= 0,522 \cdot 1,08 \cdot 0,00035 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,207 \cdot \sqrt{\frac{199425^2 - 103287^2}{5 \cdot 199425 \cdot 0,436}} \\ &= 0,05 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Расход азота на свечу:

$$V_1 = \frac{3600G}{\rho_{\text{н.у}}} = \frac{3600 \cdot 0,05}{1,25} = 142,6 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки азота на факел

При движении в сторону проточной части ЦСД азот пройдет через 7 дросселей, поэтому

$$z = 7.$$

Критическое давление газа:

$$p_{\text{кр}} = \frac{0,65 p_0}{\sqrt{z + 0,5}} = \frac{0,65 \cdot 199425}{\sqrt{7 + 0,5}} = 47333 \text{ Па}$$

Абсолютное давление коллектора свечи:

$$p_{\text{абс.св}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб.св}} = 101325 + 0,02 \cdot 98100 = 103287 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{\text{абс.св}} > p_{\text{кр}}$$

$$103287 > 47333$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.св}} = 103287 \text{ Па}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$\begin{aligned} G &= \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 \nu_0}} \\ &= 0,522 \cdot 1,08 \cdot 0,00035 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,207 \cdot \sqrt{\frac{199425^2 - 103287^2}{7 \cdot 199425 \cdot 0,436}} \\ &= 0,042 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Расход азота на факел:

$$V_2 = \frac{3600G}{\rho_{\text{н.у}}} = \frac{3600 \cdot 0,042}{1,25} = 120,6 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки азота в машинный зал

При движении в сторону машинного зала азот пройдет последние 5 дросселей:

$$z = 5.$$

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = p_{\text{св}} = 103287 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{\text{кр}} = \frac{0,65 p_0}{\sqrt{z + 0,5}} = \frac{0,65 \cdot 103287}{\sqrt{5 + 0,5}} = 28627 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{\text{атм}} > p_{\text{кр}}$$

$$101325 > 28627$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.св}} = 101325 \text{ Па}$$

Плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho = \rho_{н.у} \cdot \frac{273,15}{t_r + 273,15} \cdot \frac{p_0}{p_{атм}} = 1,25 \cdot \frac{273,15}{20 + 273,15} \cdot \frac{103287}{101325} = 1,187 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,187} = 0,842 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$\begin{aligned} G &= \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}} \\ &= 0,522 \cdot 1,08 \cdot 0,00035 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,207 \cdot \sqrt{\frac{103287^2 - 101325^2}{5 \cdot 103287 \cdot 0,842}} \\ &= 0,006 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Расход азота в машинный зал:

$$V_3 = \frac{3600G}{\rho_{н.у}} = \frac{3600 \cdot 0,006}{1,25} = 16,8 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Общий расход азота для системы уплотнений ЦСД

$$V_4 = V_1 + V_2 = 142,6 + 120,6 = 263,2 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки метана на факел

Исходные данные:

температура подаваемого газа $t_r = 10 \text{ }^\circ\text{C}$;

плотность газа при нормальных условиях $\rho_{н.у.} = 0,72 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

избыточное давление газа $p_{изб} = 1,2 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

избыточное давление факельного коллектора $p_{изб.фак} = 0,02 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

При движении в сторону факельного сброса метан пройдет через 9 дросселей, поэтому

$$z = 9.$$

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = p_{атм} + p_{изб} = 101325 + 1,2 \cdot 98100 = 219045 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{кр} = \frac{0,85p_0}{\sqrt{z + 1,5}} = \frac{0,85 \cdot 219045}{\sqrt{9 + 1,5}} = 57459 \text{ Па}$$

Абсолютное давление коллектора свечи:

$$p_{абс.фак} = p_{атм} + p_{изб.фак} = 101325 + 0,02 \cdot 98100 = 103287 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{абс.фак} > p_{кр} \\ 103287 > 57459$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{абс.фак} = 103287 \text{ Па}$$

Плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho = \rho_{н.у} \cdot \frac{273,15}{t_{г} + 273,15} \cdot \frac{p_0}{p_{атм}} = 0,72 \cdot \frac{273,15}{10 + 273,15} \cdot \frac{219045}{101325} = 1,501 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,501} = 0,666 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$G = \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}} \\ = 0,522 \cdot 1,08 \cdot 0,00035 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,207 \cdot \sqrt{\frac{219045^2 - 103287^2}{9 \cdot 219045 \cdot 0,666}} \\ = 0,032 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Расход метана на факел:

$$V_5 = \frac{3600G}{\rho_{н.у}} = \frac{3600 \cdot 0,032}{0,72} = 161,4 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки метана на первую ступень ЦНД

При движении в сторону сброса смеси пирогаза и метана на первую ступень ЦНД метан пройдет 12 дросселей:

$$z = 12.$$

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = 219045 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{\text{кр}} = \frac{0,85p_0}{\sqrt{z + 1,5}} = \frac{0,85 \cdot 219045}{\sqrt{12 + 1,5}} = 50674 \text{ Па}$$

Избыточное давление коллектора сброса на первую ступень ЦНД:

$$p_{\text{изб.ЦНД}} = 0,3 \frac{\text{КГС}}{\text{см}^2}$$

Абсолютное давление коллектора сброса на первую ступень ЦНД:

$$p_{\text{абс.ЦНД}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб.ЦНД}} = 101325 + 0,3 \cdot 98100 = 130755 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа,
а так как

$$p_{\text{абс.ЦНД}} > p_{\text{кр}}$$

$$130755 > 50674$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.ЦНД}} = 130755 \text{ Па}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$\begin{aligned} G &= \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}} \\ &= 0,522 \cdot 1,08 \cdot 0,00035 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,207 \cdot \sqrt{\frac{219045^2 - 130755^2}{12 \cdot 219045 \cdot 0,666}} \\ &= 0,025 \frac{\text{КГ}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Расход метана на первую ступень ЦНД:

$$V_6 = \frac{3600G}{\rho_{\text{н.у}}} = \frac{3600 \cdot 0,025}{0,72} = 127,2 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расход смеси азота и метана в факельный коллектор

$$V_7 = V_2 + V_5 = 120,6 + 161,4 = 282 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки пирогаза на первую ступень ЦНД

Исходные данные:

плотность газа при заданных температуре и давлении $\rho = 13,389 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

температура газа $t_{\Gamma} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

избыточное давление газа $p_{\text{изб}} = 12,7 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

Избыточное давление коллектора сброса на первую ступень ЦНД:

$$p_{\text{изб.ЦНД}} = 0,3 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2};$$

При движении в сторону сброса на первую ступень ЦНД пирогаз пройдет 15 дросселей:

$$z = 15.$$

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}} = 101325 + 12,7 \cdot 98100 = 1347195 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{\text{кр}} = \frac{0,85 p_0}{\sqrt{z + 1,5}} = \frac{0,85 \cdot 1347195}{\sqrt{15 + 1,5}} = 281908 \text{ Па}$$

Абсолютное давление коллектора свечи:

$$p_{\text{абс.фак}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб.фак}} = 101325 + 0,3 \cdot 98100 = 130755 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{\text{абс.ЦНД}} > p_{\text{кр}}$$

$$130755 \nlessgtr 281908$$

расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{кр}} = 281908 \text{ Па.}$$

Плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho_{\text{н.у}} = \rho \cdot \frac{t_{\Gamma} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_{\text{атм}}}{p_0} = 13,776 \cdot \frac{60 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101325}{1347195} = 1,263 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{13,389} = 0,074 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$G = \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 \nu_0}}$$
$$= 0,522 \cdot 1,08 \cdot 0,00035 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,207 \cdot \sqrt{\frac{1347195^2 - 281908^2}{15 \cdot 1347195 \cdot 0,074}}$$
$$= 0,199 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Расход пирогаза на первую ступень ЦНД:

$$V_5 = \frac{3600G}{\rho_{н.у}} = \frac{3600 \cdot 0,199}{1,263} = 620,9 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Параметры концевое уплотнения при радиальном зазоре $\delta_r = 0,5$ мм

Исходные данные:

радиальный зазор в концевом уплотнении $\delta_r = 0,5$ мм;

ширина гребней $b = 0,3$ мм;

шаг гребней $t = 5$ мм;

диаметр вала в области уплотнения $d_B = 200$ мм;

наибольший диаметр образующей лабиринта обоймы статора $d_6 = 209$ мм;

наименьший диаметр образующей лабиринта обоймы статора $d_M = 206$ мм;

угол наклона гребней $\theta_0 = 90$ градусов.

Радиус скругления гребней будет довольно мал, поэтому есть смысл в расчетах им пренебречь:

$$r \cong 0;$$

Камера расширения сформирована из поверхности вала и наибольшей образующей лабиринта обоймы статора, поэтому ее высота будет равна:

$$H = \frac{d_6 - d_B}{2} = \frac{209 - 200}{2} = 4,5 \text{ мм}$$

В уплотнениях с радиальными зазорами глубина промежуточной лабиринтной камеры равна сумме зазора и высоты гребня (для уплотнений с большими и малыми гребнями в формуле используется высота длинных гребней):

$$H = h_d + \delta_r$$

Найдем высоту длинных гребней:

$$h_g = H - \delta_r = 4,5 - 0,5 = 4 \text{ мм}$$

Для затупленных кромок гребня расчетный зазор принимается равным фактическому:

$$\delta_0 = \delta_r = 0,5 \text{ мм}$$

Воспользовавшись табличным значением зависимости коэффициента сужения струи μ от угла наклона гребня [1, черт. 19], получаем, что при $\theta_0 = 90$:

$$\mu_0 = 0,6;$$

Расчетная длина струи равна:

$$l = t + h_g = 5 + 4 = 9 \text{ мм}$$

Проверка условия будет выглядеть так:

$$0,24l + \mu_0 \delta_0 < H$$

$$0,24 \cdot 9 + 0,6 \cdot 0,5 < 4,5$$

$$2,46 < 4,5$$

Условие выполняется, значит струя имеет свободное истечение в камере.

Коэффициент расхода для ступенчатых уплотнений при наличии в камере свободной струи при умеренном скруглении гребня ($r < 0,6$) по эмпирической формуле можно найти так:

$$\alpha_0 \approx \left[1 + \sin \frac{\theta_0}{2} + 3 \sqrt{\frac{\delta_0}{l}} \left(\sin \frac{\theta_0}{2} \right)^3 \right]^{-1} = \left[1 + \sin \frac{90}{2} + 3 \sqrt{\frac{0,5}{9}} \left(\sin \frac{90}{2} \right)^3 \right]^{-1} \\ = 0,511$$

Поправка на малое число дросселей при одинаковых коэффициентах расхода:

$$\xi = 1;$$

Для выбора коэффициента поправки на толщину кромки гребня найдем отношение толщины гребня к величине расчетного радиального зазора:

$$\frac{b}{\delta_0} = \frac{0,3}{0,5} = 0,6$$

Определим по графику [1, черт. 18] поправку на толщину кромки гребня:

$$\beta \cong 1,05;$$

Проверим условие на внезапное расширение струи, в результате которого может увеличиться протечка:

$$\begin{aligned} b &> 4(\delta_r - \mu_0 \delta_0) \\ 0,3 &> 4(0,5 - 0,6 \cdot 0,5) \\ 0,3 &\not> 0,8 \end{aligned}$$

Расчет протечки азота на свечу

Исходные данные:

температура подаваемого газа $t_r = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;

плотность газа при нормальных условиях $\rho_{н.у.} = 1,25 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

избыточное давление газа $p_{изб} = 1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

избыточное давление коллектора свечи $p_{изб.св} = 0,02 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

число дросселей $z = 5$;

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = p_{атм} + p_{изб} = 101325 + 1 \cdot 98100 = 199425 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{кр} = \frac{0,65 p_0}{\sqrt{z + 0,5}} = \frac{0,65 \cdot 199425}{\sqrt{5 + 0,5}} = 55273 \text{ Па}$$

Абсолютное давление коллектора свечи:

$$p_{абс.св} = p_{атм} + p_{изб.св} = 101325 + 0,02 \cdot 98100 = 103287 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа,
а так как

$$p_{\text{абс.св}} > p_{\text{кр}}$$
$$103287 > 55273$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.св}} = 103287 \text{ Па}$$

Плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho = \rho_{\text{н.у}} \cdot \frac{273,15}{t_{\text{г}} + 273,15} \cdot \frac{p_0}{p_{\text{атм}}} = 1,25 \cdot \frac{273,15}{20 + 273,15} \cdot \frac{199425}{101325} = 2,292 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{2,292} = 0,436 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$G = \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}}$$
$$= 0,511 \cdot 1,05 \cdot 0,0005 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,207 \cdot \sqrt{\frac{199425^2 - 103287^2}{5 \cdot 199425 \cdot 0,436}}$$
$$= 0,055 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Расход азота на свечу:

$$V_1 = \frac{3600G}{\rho_{\text{н.у}}} = \frac{3600 \cdot 0,055}{1,25} = 158 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки азота на факел

При движении в сторону проточной части ЦСД азот пройдет через 7 дросселей, поэтому

$$z = 7.$$

Критическое давление газа:

$$p_{\text{кр}} = \frac{0,65 p_0}{\sqrt{z + 0,5}} = \frac{0,65 \cdot 199425}{\sqrt{7 + 0,5}} = 47333 \text{ Па}$$

Абсолютное давление коллектора свечи:

$$p_{\text{абс.св}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб.св}} = 101325 + 0,02 \cdot 98100 = 103287 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{\text{абс.св}} > p_{\text{кр}}$$

$$103287 > 47333$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.св}} = 103287 \text{ Па}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$G = \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}}$$

$$= 0,511 \cdot 1,05 \cdot 0,0005 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,207 \cdot \sqrt{\frac{199425^2 - 103287^2}{7 \cdot 199425 \cdot 0,436}}$$

$$= 0,046 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Расход азота на факел:

$$V_2 = \frac{3600G}{\rho_{\text{н.у}}} = \frac{3600 \cdot 0,046}{1,25} = 133,6 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки азота в машинный зал

При движении в сторону машинного зала азот пройдет последние 5 дросселей:

$$z = 5.$$

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = p_{\text{св}} = 103287 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{\text{кр}} = \frac{0,65 p_0}{\sqrt{z + 0,5}} = \frac{0,65 \cdot 103287}{\sqrt{5 + 0,5}} = 28627 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{\text{атм}} > p_{\text{кр}}$$

$$101325 > 28627$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.св}} = 101325 \text{ Па}$$

Плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho = \rho_{\text{н.у}} \cdot \frac{273,15}{t_{\text{г}} + 273,15} \cdot \frac{p_0}{p_{\text{атм}}} = 1,25 \cdot \frac{273,15}{20 + 273,15} \cdot \frac{103287}{101325} = 1,187 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,187} = 0,842 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$\begin{aligned} G &= \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}} \\ &= 0,511 \cdot 1,05 \cdot 0,0005 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,207 \cdot \sqrt{\frac{103287^2 - 101325^2}{5 \cdot 103287 \cdot 0,842}} \\ &= 0,006 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Расход азота в машинный зал:

$$V_3 = \frac{3600G}{\rho_{\text{н.у}}} = \frac{3600 \cdot 0,006}{1,25} = 18,6 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Общий расход азота для системы уплотнений ЦСД

$$V_4 = V_1 + V_2 = 158 + 133,6 = 291,6 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки метана на факел

Исходные данные:

температура подаваемого газа $t_{\text{г}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$;

плотность газа при нормальных условиях $\rho_{\text{н.у.}} = 0,72 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

избыточное давление газа $p_{\text{изб}} = 1,2 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

избыточное давление факельного коллектора $p_{\text{изб.фак}} = 0,02 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

При движении в сторону факельного сброса метан пройдет через 9 дросселей, поэтому

$$z = 9.$$

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}} = 101325 + 1,2 \cdot 98100 = 219045 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{\text{кр}} = \frac{0,85p_0}{\sqrt{z + 1,5}} = \frac{0,85 \cdot 219045}{\sqrt{9 + 1,5}} = 57459 \text{ Па}$$

Абсолютное давление факельного коллектора:

$$p_{\text{абс.фак}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб.фак}} = 101325 + 0,02 \cdot 98100 = 103287 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{\text{абс.фак}} > p_{\text{кр}}$$

$$103287 > 57459$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.фак}} = 103287 \text{ Па}$$

Плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho = \rho_{\text{н.у}} \cdot \frac{273,15}{t_{\text{г}} + 273,15} \cdot \frac{p_0}{p_{\text{атм}}} = 0,72 \cdot \frac{273,15}{10 + 273,15} \cdot \frac{219045}{101325} = 1,501 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,501} = 0,666 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$\begin{aligned} G &= \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}} \\ &= 0,511 \cdot 1,05 \cdot 0,0005 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,207 \cdot \sqrt{\frac{219045^2 - 103287^2}{9 \cdot 219045 \cdot 0,666}} \\ &= 0,036 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Расход метана на факел:

$$V_5 = \frac{3600G}{\rho_{\text{н.у}}} = \frac{3600 \cdot 0,036}{0,72} = 178,8 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки метана на первую ступень ЦНД

При движении в сторону сброса смеси пирогаза и метана на первую ступень ЦНД метан пройдет 12 дросселей:

$$z = 12.$$

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = 219045 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{кр} = \frac{0,85p_0}{\sqrt{z + 1,5}} = \frac{0,85 \cdot 219045}{\sqrt{12 + 1,5}} = 50674 \text{ Па}$$

Избыточное давление коллектора сброса на первую ступень ЦНД:

$$p_{изб.ЦНД} = 0,3 \frac{\text{КГС}}{\text{см}^2}$$

Абсолютное давление коллектора сброса на первую ступень ЦНД:

$$p_{абс.ЦНД} = p_{атм} + p_{изб.ЦНД} = 101325 + 0,3 \cdot 98100 = 130755 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{абс.ЦНД} > p_{кр}$$

$$130755 > 50674$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{абс.ЦНД} = 130755 \text{ Па.}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$\begin{aligned} G &= \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}} \\ &= 0,511 \cdot 1,05 \cdot 0,0005 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,207 \cdot \sqrt{\frac{219045^2 - 130755^2}{12 \cdot 219045 \cdot 0,666}} \\ &= 0,028 \frac{\text{КГ}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Расход метана на первую ступень ЦНД:

$$V_6 = \frac{3600G}{\rho_{н.у}} = \frac{3600 \cdot 0,028}{0,72} = 140,9 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расход смеси азота и метана в факельный коллектор

$$V_7 = V_2 + V_5 = 133,6 + 178,8 = 312,4 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

Расчет протечки пирогаза на первую ступень ЦНД

Исходные данные:

плотность газа при заданных температуре и давлении $\rho = 13,389 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

температура газа $t_{\Gamma} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

избыточное давление газа $p_{\text{изб}} = 12,7 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$;

Избыточное давление коллектора сброса на первую ступень ЦНД:

$$p_{\text{изб.ЦНД}} = 0,3 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2};$$

При движении в сторону сброса на первую ступень ЦНД пирогаз пройдет 15 дросселей:

$$z = 15.$$

Абсолютное давление газа:

$$p_0 = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}} = 101325 + 12,7 \cdot 98100 = 1347195 \text{ Па}$$

Критическое давление газа:

$$p_{\text{кр}} = \frac{0,85p_0}{\sqrt{z + 1,5}} = \frac{0,85 \cdot 1347195}{\sqrt{15 + 1,5}} = 281908 \text{ Па}$$

Абсолютное давление факельного коллектора:

$$p_{\text{абс.фак}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб.фак}} = 101325 + 0,3 \cdot 98100 = 130755 \text{ Па}$$

В качестве расчетного давления будет принято большее давление газа, а так как

$$p_{\text{абс.ЦНД}} > p_{\text{кр}} \\ 130755 \neq 281908,$$

то расчетное давление составит:

$$p = p_{\text{абс.фак}} = 281908 \text{ Па.}$$

Плотность газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho_{\text{н.у}} = \rho \cdot \frac{t_{\Gamma} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_{\text{атм}}}{p_0} = 13,776 \cdot \frac{60 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101325}{1347195} = 1,263 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельный объем газа при заданных температуре и давлении:

$$v_0 = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{13,389} = 0,075 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Протечка газа через уплотнение составит:

$$G = \alpha_0 \beta \delta_0 \xi \pi d \sqrt{\frac{p_0^2 - p^2}{z p_0 v_0}}$$

$$= 0,511 \cdot 1,05 \cdot 0,0005 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,207 \cdot \sqrt{\frac{1347195^2 - 281908^2}{15 \cdot 1347195 \cdot 0,075}}$$

$$= 0,22 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Расход пирогаза на первую ступень ЦНД:

$$V_5 = \frac{3600G}{\rho_{н.у}} = \frac{3600 \cdot 0,22}{1,263} = 687,9 \frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}$$

4.6 Результаты расчетов протечек с учетом скругления гребней в 0,2, 0,5 и 1,5 мм

Представленный в разделе расчет выполнялся для гребней с радиусом скругления равным 1,5 мм. Для оценки влияния радиуса скругления гребня на величину протечек через участки лабиринтов было решено провести расчеты для гребней с гораздо меньшим радиусом скругления, равным 0,2 и 0,5 мм.

Результаты расчетов протечек газа через участки лабиринтного уплотнения для гребней со скруглением в 0,2, 0,5 и 1,5 мм (ЦВД) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Протечки газа с радиальным зазором 0,35 и 0,5 мм и радиусом скругления 0,2, 0,5 и 1,5 мм

	0,35; 0,2	0,35; 0,5	0,35; 1,5	0,5; 0,2	0,5; 0,5	0,5; 1,5
Азот на свечу, кг/с	0,032	0,035	0,05	0,045	0,047	0,055
Азот на факел, кг/с	0,027	0,029	0,042	0,038	0,04	0,046
Азот в маш. зал, кг/с	0,004	0,004	0,006	0,005	0,006	0,006

Продолжение таблицы 1

Метан на факел, кг/с	0,021	0,023	0,032	0,029	0,031	0,036
Метан в кол. ЦНД, кг/с	0,017	0,018	0,025	0,023	0,024	0,028
Пирогаз в кол. ЦНД, кг/с	0,13	0,14	0,199	0,179	0,189	0,22

Результаты расчетов расхода газа через участки лабиринтного уплотнения для гребней со скруглением в 0,2, 0,5 и 1,5 мм (ЦВД) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расход газа с радиальным зазором 0,35 и 0,5 мм и радиусом скругления 0,2, 0,5 и 1,5 мм

	0,35; 0,2	0,35; 0,5	0,35; 1,5	0,5; 0,2	0,5; 0,5	0,5; 1,5
Азот на свечу, м ³ /ч	93,4	100,5	142,6	128,4	135,3	158
Азот на факел, м ³ /ч	78,9	84,9	133,6	108,5	114,3	133,6
Азот в маш. зал, м ³ /ч	11	11,8	16,8	15,1	15,9	18,6
Метан на факел, м ³ /ч	105,7	113,7	161,4	145,2	153,1	178,8
Метан в кол. ЦНД, м ³ /ч	83,3	89,6	127,2	114,4	120,6	140,9
Пирогаз в кол. ЦНД, м ³ /ч	406,5	437,5	620,9	558,7	588,8	687,9

4.7 Анализ влияния величины скругления гребней на величину протечки через участки лабиринтного уплотнения ЦВД

Данные по величине протечек газа через участки лабиринтного уплотнения при различных радиусах скругления приведены на рисунке 16.

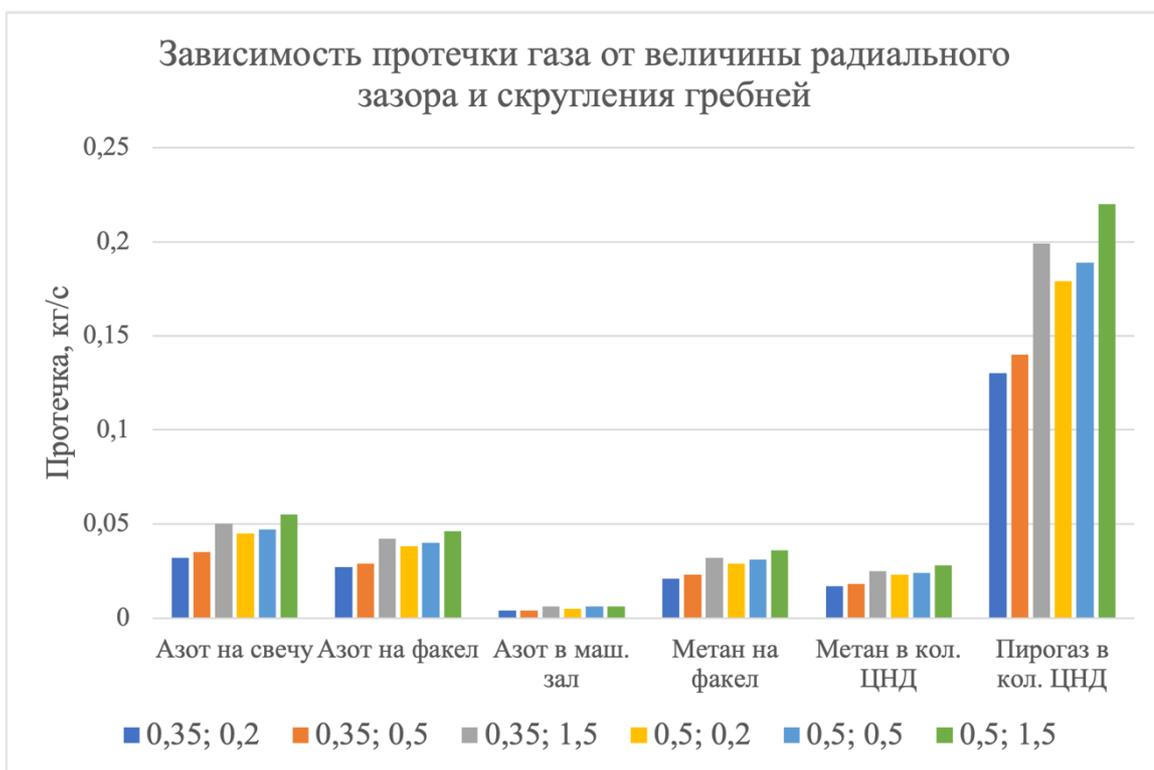


Рисунок 16 – Зависимость величины протечки газа через участок лабиринтного уплотнения в зависимости от величины радиального зазора и радиуса скругления

Данные по расходу через участки лабиринтного уплотнения ЦВД были отображены на рисунке 17.

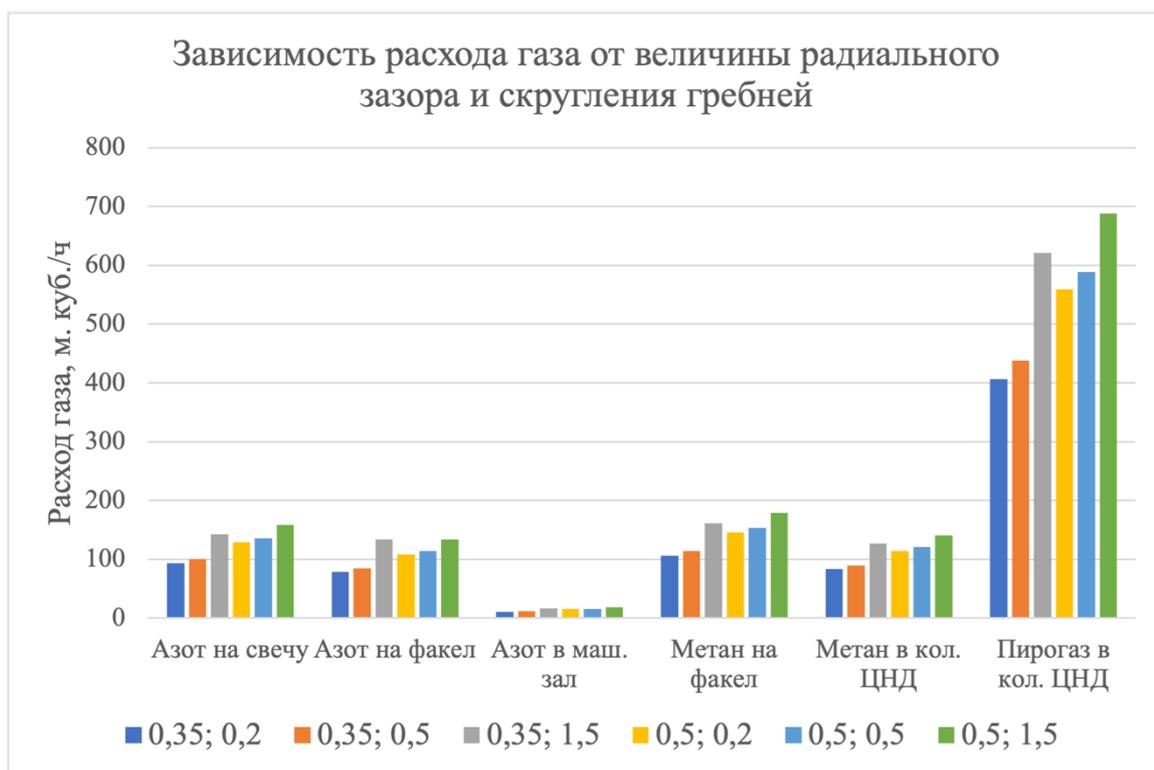


Рисунок 17 – Зависимость величины расхода газа через участок лабиринтного уплотнения в зависимости от величины радиального зазора и радиуса скругления

На рисунке можно видеть, что увеличение радиуса скругления гребней ротора ведет к повышению расхода через участок лабиринтного уплотнения.

Для участков уплотнений с величиной радиального зазора $\delta_r = 0,35$ мм разница между радиусом скругления в 0,2 и 0,5 мм составила около 7 %, разница между скруглением 0,2 и 1,5 мм составила около 52 %.

Для участков с уплотнений с величиной радиального зазора $\delta_r = 0,5$ мм разница в расходе получилась несколько ниже. Между скруглением в 0,2 и 0,5 мм увеличение расхода составило около 5 %, также динамика роста расхода со скруглениями в 1,5 мм существенно снизилась в среднем до 23 %.

Необходимо принять во внимание тот факт, что рассчитанные величины протечек и расхода через участки лабиринтного уплотнения получены для одной обоймы ЦВД, а в одном корпусе их установлено две штуки, а всего корпусов три (ЦНД, ЦСД и ЦВД). Поэтому, необходимо стремиться к получению гребней, обеспечивающих наименьший расход газа.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

С течением времени промышленное оборудование нуждается во внесении тех или иных изменений в исходную конструкцию. Это может быть связано с появлением более строгих требований в области промышленной безопасности и/или экологии, также изменения могут быть связаны с изменением технологии производства на объекте (изменение рабочего вещества, повышение производительности установки и др.). Но наиболее часто модернизации используются для повышения надежности того или иного узла в составе машины. В работе рассматривается модернизация лабиринтных уплотнений, которая позволит увеличить наработку компрессора между ремонтами, так как в данный момент останов компрессора на ремонт осуществляется из-за образования отложений в существующей системе лабиринтных уплотнений. В данном разделе оценивается экономическая эффективность предлагаемой модернизации.

5.1 Капитальные вложения

Стоимость модернизации концевых лабиринтных уплотнений центробежного компрессора складывается из следующих составляющих: затраты на оплату труда, затраты на материалы и комплектующие, амортизационные отчисления, затраты на транспортировку и затраты на монтаж.

5.1.1 Затраты на оплату труда

Затраты на оплату труда включают: оплату труда специалистов организации-исполнителя, оплату труда выездных специалистов, оплату труда ремонтной бригады и связанные с ними отчисления во внебюджетные страховые фонды.

Затраты на оплату труда специалистов организации-исполнителя с учетом НДФЛ $Z_{з.п.спец.}$:

$$Z_{з.п.спец.} = Ч \cdot О \cdot V_p \cdot K_p \cdot 0,87 \quad (28)$$

где Ч – количество человек;

O – месячный оклад сотрудника, руб.;

V_p – время на работу, месяцев;

K_p – районный коэффициент.

Затраты на оплату труда специалистов организации-исполнителя представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Затраты на оплату труда специалистов

	Ведущий инженер-проектировщик	Инженер-проектировщик	Оператор станка с ЧПУ
Количество, чел.	1	2	1
Оклад, руб.	45000	35000	35000
Время на работу, мес.	3	3	0,5
Районный коэффициент	1,3	1,3	1,3
Заработная плата с учетом надбавок и НДФЛ, руб.	152685	237510	19792,5
Итого, руб.	409987,5		

Помимо разработки проекта, исполнитель по условиям договора должен провести шефмонтаж и шефналадку новой системы, а также провести экспертизу промышленной безопасности внедряемого решения.

Затраты на оплату труда и командировочных расходов выездных специалистов организации-исполнителя с учетом НДФЛ $Z_{з.п. спец.}$:

$$Z_{з.п. спец.} = Ч \cdot Z_{ср. дн.} \cdot V_p \cdot 0,87 \quad (29)$$

где $Z_{ср. дн.}$ – среднедневная заработная плата специалиста.

Командировочные расходы состоят из затрат на транспорт выездных сотрудников $Z_{тр. сотр.}$ (маршрут туда и обратно), затрат на проживание $Z_{прожив.}$ и затрат на суточные для каждого сотрудника $Z_{сут. за период}$. Затраты на командировочные $Z_{команд.}$:

$$Z_{команд.} = Z_{тр. сотр.} + Z_{прожив.} + Z_{сут. за период} \quad (30)$$

Затраты на билеты составят:

$$Z_{тр. сотр.} = Ч \cdot C_{билет} \quad (31)$$

где $C_{билет}$ – цена билета на маршрут туда и обратно.

Затраты на проживание составят:

$$Z_{\text{прожив.}} = Ч \cdot Ц_{\text{место/сут}} \cdot D_{\text{команд.}} \quad (32)$$

где $C_{\text{место/сут}}$ – стоимость за сутки проживания в гостинице;

$D_{\text{команд.}}$ – количество дней проживания.

Затраты на выплату суточных за весь период пребывания в командировке:

$$Z_{\text{сут.за период}} = Ч \cdot Z_{\text{сут.}} \cdot D_{\text{команд.}} \quad (33)$$

где $Z_{\text{сут.}}$ – затраты на одного человека в сутки, руб.

Затраты на оплату труда и командировочные выплаты выездных специалистов организации-исполнителя указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Затраты на оплату труда и командировочных выездных специалистов

	Ведущий специалист	Специалист
Количество	1	1
Суточные, руб./сут.	700	700
Время работы, дней	14	14
Среднедневной заработок, руб.	4320	3524
Оплата труда за время пребывания в командировке с НДФЛ, руб.	52617,6	42922,3
Проживание, руб./сут.	2000	2000
Затраты на транспорт, руб.	18590	18590
Суммарные затраты на человека, руб.	109007,6	99312,3
Итого, руб.	208319,9	

Оценочное время на проведение капитального ремонта центробежного компрессора составляет 340 часов.

Допустим, что ремонт компрессора осуществляется слесарями по ремонту технологических установок в количестве 6 человек (четыре слесаря 5 разряда и два слесаря 6 разряда) и одним мастером.

Затраты на оплату труда ремонтной бригады оцениваются по формуле:

$$Z_{\text{з.п.спец.}} = Ч \cdot О \cdot B_p \cdot K_p \cdot K_{\text{вредн.}} \cdot K_{\text{ночн.}} \cdot 0,87 \quad (34)$$

где $K_{\text{вредн.}}$ – коэффициент доплаты за вредные и опасные условия труда; $K_{\text{ночн.}}$ – коэффициент доплаты за работу в ночное время.

В таблице 3 приведены результаты расчетов затраты на оплату труда ремонтной бригады организации-заказчика.

Таблица 3 – Затраты на оплату труда ремонтной бригады

	Мастер	Слесарь по ремонту т. у. 6 р.	Слесарь по ремонту т. у. 5 р.
Количество, чел.	1	2	4
Оклад, руб.	40000	32000	25000
Время на работу, мес.	0,347	0,347	0,347
Время на работу ночью, мес.	0,153	0,153	0,153
Районный коэффициент	1,3	1,3	1,3
Доплата за вредные и опасные условия работы (12 %)	1,12	1,12	1,12
Доплата за работу в ночное время (20 %)	1,2	1,2	1,2
Заработная плата с учетом надбавок и НДФЛ, руб.	26884,86	43015,78	67212,16
Итого, руб.	137112,8		

5.1.2 Затраты на отчисления во внебюджетные страховые фонды

Работодатель обязан ежемесячно перечислять страховые взносы с выплат, начисленных сотрудникам.

За оформленных по трудовому договору сотрудников работодатель делает следующие отчисления:

- на пенсионное страхование (в ПФР);
- на медицинское страхование (в ФОМС);
- на страхование на случай временной нетрудоспособности или материнства (в ФСС);
- на страхование от несчастных случаев или профессиональных заболеваний.

Затраты на страховые взносы за каждого сотрудника оцениваются по формуле:

$$Z_{с.в.} = Z_{з.п.} \cdot (K_{ПФР} \cdot K_{ФСС} \cdot K_{ФОМС} \cdot K_{несч.сл.}) \quad (35)$$

где $K_{ПФР}$ – коэффициент к выплате в пенсионный фонд;

$K_{ФСС}$ – коэффициент к выплате в службу социального страхования;

$K_{ФОМС}$ – коэффициент к выплате на обязательное медицинское страхование;

$K_{несч.сл.}$ – коэффициент к выплате на страхование от несчастных случаев.

В таблице 4 представлены затраты на отчисления во внебюджетные страховые фонды специалистов организации-исполнителя.

Таблица 4 – Затраты на страховые взносы специалистов

	Ведущий инженер-проектировщик	Инженер-проектировщик	Оператор станка с ЧПУ
Количество	1	2	1
Заработная плата, руб.	152685	237510	19792,5
ПФР (22 %)	33590,7	52252,2	4354,35
ФСС (2,9 %)	4427,87	6887,79	573,98
ФОМС (5,1 %)	7786,94	12113,01	1009,42
Страхование от несчастных случаев или профессиональных заболеваний (0,2 %, 1,3 %)	305,37	475,02	257,3
Всего, руб.	46110,88	71728,02	6195,05
Затраты, руб.	124033,95		

В таблице 5 представлены затраты на отчисления во внебюджетные страховые фонды выездных специалистов организации-исполнителя.

Таблица 5 – Затраты на страховые взносы выездных специалистов

	Ведущий специалист	Специалист
Количество	1	1
Заработная плата, руб.	52617,6	42922,3
ПФР (22 %)	11575,87	9422,9
ФСС (2,9 %)	1525,91	1244,74
ФОМС (5,1 %)	2683,49	2189,03

Продолжение таблицы 5

Страхование от несчастных случаев или профессиональных заболеваний (1,3 %)	684,03	557,99
Всего, руб.	16469,3	13414,66
Затраты, руб.	29883,96	

В таблице 6 представлены затраты на отчисления во внебюджетные страховые фонды ремонтной бригады организации-заказчика.

Таблица 6 – Затраты на страховые взносы ремонтной бригады

	Мастер	Слесарь по ремонту т. у. 6 р.	Слесарь по ремонту т. у. 5 р.
Количество	1	2	4
Заработная плата, руб.	26884,86	43015,78	67212,16
ПФР (22 %)	5914,67	9463,47	14786,67
ФСС (2,9 %)	779,66	1247,45	1949,15
ФОМС (5,1 %)	1371,12	2193,8	3427,82
Страхование от несчастных случаев или профессиональных заболеваний (1,3 %)	349,5	559,2	873,75
Всего, руб.	8414,95	13463,92	21037,39
Итого, руб.	42916,26		

5.1.3 Затраты на амортизационные отчисления, материалы и комплектующие

Согласно проекту, будет изготовлено 12 обойм. На каждый цилиндр сжатия предусмотрено по 4 обоймы (2 из них запасные). Обоймы изготавливаются из стали 20. Вес обойм ЦНД и ЦСД одинаков и составляет 89,4 кг, обойма ЦВД весит 81,7 кг. Затраты на материал для изготовления обойм рассчитываются $Z_{\text{мат.}}$:

$$Z_{\text{мат.}} = Z_{\text{мат./кг}} \cdot M_{\text{изд}} \quad (36)$$

где $Z_{\text{мат./кг}}$ – стоимость материала, руб./кг;

$M_{\text{изд}}$ – масса изделий, кг.

Оценка стоимости материалов для изготовления обойм представлена в таблице 7.

Таблица 7 – Затраты на материалы

Наименование	Материал	Количество, шт.	Стоимость за кг., руб.	Масса изделия, кг.	Затраты, руб.
Обойма ЦНД	Сталь 20	4	55	89,4	19668
Обойма ЦСД	Сталь 20	4	55	89,4	19668
Обойма ЦВД	Сталь 20	4	55	81,7	17974
Итого		12		1042	57310

Амортизация начисляется нелинейным методом по следующей формуле:

$$Z_{\text{аморт.}} = Z_{\text{аморт.тек.}} \cdot N_{\text{аморт.мес.}} \cdot V_p \quad (37)$$

где $Z_{\text{аморт.тек.}}$ – сумма амортизации на текущий период, руб.;

$N_{\text{аморт.мес.}}$ – норма амортизации за месяц, %.

Затраты на амортизационные отчисления используемого в работе оборудования указаны в таблице 8.

Таблица 8 – Затраты на амортизационные отчисления

	Станок металлообрабатывающий с ЧПУ	Электрический кран-балка
Амортизационная группа	5	7
Норма амортизации за месяц (%)	2,7	1,3
Сумма амортизации на текущий период, руб.	2465850	651432
Время работы оборудования, мес.	0,097	0,014
Сумма амортизации за время работы, руб.	6458,06	118,56
Итого, руб.	6576,62	

Для обеспечения нормальной работы узла уплотнений предусмотрено наличие минимального набора КИП и элементов трубопроводной арматуры. Перечень и стоимость комплектующих приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Затраты на комплектующие

Наименование	Количество, шт.	Цена за шт., руб.	Затраты, руб.
Расходомерное устройство	2	73800	147600
Датчик давления	4	14600	58400
Датчик перепада давления	2	25000	50000
Датчик температуры	2	2500	5000
Датчик ДВК	1	8600	8600
Задвижка DN 125 PN 16	1	78900	78900
Клапан регулирующий DN 125 PN 16	2	163400	326800
Обратный клапан DN 125 PN 16	2	39400	78800
Итого			754100

Суммарные затраты на комплектующие составят:

$$Z_{\text{компл.}} = 754100 \text{ руб.}$$

5.1.4 Затраты на транспортировку

Транспортировка осуществляется автомобильным транспортом. Согласно информации транспортной компании, затраты на грузоперевозку $Z_{\text{трансп.}}$ составят 261101 руб.

5.1.5 Затраты на проведение мероприятия

Затраты на проведение мероприятия включают все вышеперечисленные затраты. Также в затраты на проведение мероприятия включены накладные расходы, которые могут не иметь прямого отношения к осуществляемым мероприятиям, но могут сопровождать процесс проектирования и монтажа, на накладные расходы было выделено 15 % от общих затрат. Затраты на накладные расходы составят:

$$\begin{aligned} Z_{\text{накл.}} &= (Z_{\text{опл.}} + Z_{\text{с.в.}} + Z_{\text{мат.}} + Z_{\text{аморт.}} + Z_{\text{компл.}} + Z_{\text{трансп.}}) \cdot 0,15 \\ &= (653630,2 + 196834,17 + 57310 + 6576,62 + 754100 \\ &\quad + 261101) \cdot 0,15 = 289432,77 \text{ руб. (38)} \end{aligned}$$

Перечень затрат на проведение мероприятия и их стоимость указаны в таблице 10.

Таблица 10 – Затраты на проведение мероприятия

Затраты	Сумма затрат, руб.
Затраты на оплату труда	653630,2
Затраты на отчисления во внебюджетные страховые фонды	196834,17
Затраты на материалы	57310
Затраты на амортизационные отчисления	6576,62
Затраты на комплектующие	754100
Затраты на транспортировку	261101
Накладные расходы (15 %)	289432,77
Итого	2218984,76

5.2 Оценка экономической эффективности

Текущий межремонтный период для турбокомпрессора составляет 2 года. Установка модернизированного узла позволит увеличить межремонтный период до 4 лет.

Капитальный ремонт центробежного компрессора ориентировочно занимает 340 часов.

Если взять период эксплуатации компрессора в 4 года, то при текущем состоянии компрессора без модернизации потребуются провести 2 ремонта. Для компрессора с модернизированным уплотнительным узлом будет проведен 1 ремонт.

Стоимость одного ремонта будет включать затраты на оплату труда ремонтной бригады, а также амортизационных отчислений на эксплуатируемое на время ремонта оборудование.

Затраты на оплату труда ремонтной бригады со страховыми взносами $Z_{\text{опл.рем.}}$:

$$Z_{\text{опл.}} = Z_{\text{з.п.}} + Z_{\text{с.в.}} = 137112,8 + 42916,26 = 180029,06 \text{руб.} \quad (39)$$

Затраты на амортизационные отчисления крана-балки $Z_{\text{аморт.}}$:

$$Z_{\text{аморт.}} = 118,56 \text{руб.}$$

Затраты на проведение одного ремонта $Z_{\text{рем.}}$:

$$Z_{\text{рем.}} = Z_{\text{опл.}} + Z_{\text{аморт.}} = 180029,06 + 118,56 = 180147,62 \text{руб.} \quad (40)$$

Экономический эффект за 5 лет только на оплату труда и амортизацию оборудования составит:

$$\mathcal{E} = 2 \cdot Z_{\text{рем.}} - Z_{\text{рем.}} = 2 \cdot 180147,62 - 180147,62 = 180147,62 \text{руб.} \quad (41)$$

Заключение

Внедрение модернизации лабиринтных концевых уплотнений позволит увеличить межремонтный период работы центробежного компрессора с 2 до 4 лет. Стоимость проведения модернизации оценивается в 2218984,76 руб.

Как правило, стоимость запасных частей, расходных материалов и диагностических операций при проведении ремонта может варьироваться от незначительных до весьма ощутимых, поэтому в оценку экономической эффективности включены хорошо прогнозируемые расходы: затраты на оплату труда ремонтной бригады и амортизационные отчисления на оборудование, участвующее при проведении ремонта. Экономический эффект от проведения ремонта оценивается в 340 часов и 180147,62 руб. за 4 года.

Данный проект реализуется в рамках программы по увеличению межремонтного периода до 4 лет, что в комплексе с другими улучшениями на производствах полиэтилена и полипропилена даст значительную экономию, выраженную в количестве продукции, произведенной за дополнительные 340 часов работы завода. Проведение модернизации на установке компримирования и разделения пирогаза затрудняет оценку экономической эффективности на время простоя оборудования, так как цены на промежуточную продукцию установить затруднительно.

6 Социальная ответственность

Введение

Данная работа посвящена модернизации торцевых лабиринтных уплотнений центробежного компрессора путем добавления в конструкцию подвода затворного газа. Такое решение позволит увеличить надежность узла (увеличить межремонтный период), а также сократить утечки газа в рабочую зону.

Центробежный компрессор используется на установке компримирования и разделения пирогаза. Эксплуатацией и ежедневным обслуживанием данного оборудования занимается рабочий персонал, а именно машинисты компрессорных установок.

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Технологический процесс на большинстве крупных промышленных предприятий предполагает непрерывный характер его ведения. Поэтому на нефтехимических заводах работа эксплуатационного персонала организована по сменному графику.

Статья 103 Трудового кодекса Российской Федерации определяет особенности ведения работы по сменному графику.

Стоит отметить, что нефтехимические производства относятся к категории опасных производственных объектов. Из-за вредных условий труда и риска возникновения опасных условий на таких предприятиях устанавливается повышенная оплата. Статья 147 ТК РФ допускает повышенную оплату труда, а вот конкретная доплата зависит от специальной оценки условий труда, которая регулируется Федеральным законом от 28.12.2013 № 426-ФЗ "О специальной оценке условий труда".

Эксплуатацией компрессорной установки занимаются машинисты компрессорных установок. Конкретные должностные обязанности определяются, по большей части, условиями эксплуатации оборудования, на это может влиять и место расположения компрессорной установки в

технологической цепочке и характер работы оборудования (периодический или постоянный), а также разновидность самого компрессорного оборудования. В данной ситуации осуществляется непрерывная эксплуатация многосекционного центробежного компрессора. Порядок ведения технологического процесса для эксплуатационного персонала закреплен в должностной инструкции.

Несмотря на большое разнообразие условий эксплуатации компрессоров, существуют общепринятые операции, которые заключаются в ежесменном обходе и обслуживании оборудования. Ведение технологического процесса машинистом компрессорных установок на складах хранения сжиженных газов несколько отличается от ведения технологического процесса того же машиниста на установке компримирования и разделения пирогаза.

Предприятия, на которых осуществляется работа машинистов компрессорных установок, относятся к опасным производственным объектам. В частности, работа на нефтехимических предприятиях регламентируется следующими документами:

- приказ Ростехнадзора № 533 от 15.12.2020 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств";
- приказ Ростехнадзора № 534 от 15.12.2020 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности";
- федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила безопасного ведения газоопасных, огневых и ремонтных работ", утвержденные приказом Ростехнадзора от 20 ноября 2017 года № 485;

- приказ Ростехнадзора от 29 марта 2016 года № 125 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности нефтегазоперерабатывающих производств";
- Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов".

6.2 Производственная безопасность

Производственная безопасность создана для предотвращения, недопущения или сокращения действия опасных и вредных производственных факторов.

Для идентификации опасных и вредных производственных факторов был разработан ГОСТ 12.0.003-2015 "Опасные и вредные производственные факторы".

6.2.1 Анализ опасных и вредных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации модернизации в составе компрессорного агрегата

Таблица 1 – Опасные и вредные факторы при эксплуатации модернизации

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этап работы	Нормативные документы
	Эксплуатация	
Повышенный уровень общей и локальной вибрации	+	ГОСТ 12.1.012-2004 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»
Повышенный уровень и другие неблагоприятные характеристики шума	+	СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»

Продолжение таблицы 1

Опасные и вредные производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разностью потенциалов, под действие которого попадает работающий	+	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
Движущиеся твердые, жидкие или газообразные объекты, наносящие удар по телу работающего	+	Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасного ведения газоопасных, огневых и ремонтных работ»
Чрезмерное загрязнение воздушной среды в зоне дыхания	+	ГОСТ 12.4.021-75 ССБТ. Системы вентиляционные. Общие требования ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны

Повышенный уровень общей и локальной вибрации. Источником фактора является динамическое оборудование – многоступенчатый центробежный компрессор с паровой турбиной. В СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» указаны следующие предельно допустимые значения и уровни технологической вибрации.

Таблица 2 – Значения общей технологической вибрации

Вид вибрации	Категория вибрации	Направление действия	Фильтр частотной коррекции	Эквивалентные скорректированные уровни виброускорения	
				м/с ²	дБ
Общая	Технологическая вибрация на стационарных рабочих местах	Zo	Wk	0,1	100
		Xo, Yo	Wd	0,071	97

Повышенный уровень и другие неблагоприятные характеристики шума. Помимо повышенной вибрации турбокомпрессорное оборудование создает

повышенный уровень шума в машинном зале. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» устанавливает следующие гигиенические нормативы по оценке уровня воздействия шума на работающих:

- Эквивалентный уровень звука (L_{pAeqT} , дБА), уровень, воздействующий на работающего за рабочую смену (измеренный или рассчитанный относительно 8 ч рабочей смены);
- Максимальные уровни звука А, измеренные с временными коррекциями S и I ($L_{pA\ max}$) – наибольшая величина уровня звука, измеренная на заданном интервале времени со стандартной временной коррекцией;
- Пиковый скорректированный по С уровень звука ($L_{pC\ peak}$), дБС – С – взвешенное наибольшее значение за время измерений.

Нормативным эквивалентным уровнем звука (L_{pAeqT} , дБА), на рабочих местах, является 80 дБА. Максимальными уровнями звука А, измеренными с временными коррекциями S и I, являются 110 дБА и 125 дБА соответственно. Пиковым скорректированным по С уровнем звука ($L_{pC\ peak}$), дБС является 137 дБС.

Опасные и вредные производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разностью потенциалов, под действие которого попадает работающий. В машинном зале существует множество объектов питания электрическим током, которые могут представлять опасность для человека.

Согласно ГОСТ 12.1.019-2017 для обеспечения защиты от прямого прикосновения необходимо применять следующие технические способы и средства (основная защита):

- Основная изоляция;
- Защитные оболочки;
- Защитные ограждения (временные или стационарные);
- Защитные барьеры;

- Безопасное расположение токоведущих частей, размещение их вне зоны досягаемости частям тела, конечностями;
- И др.

Согласно ГОСТ 12.1.038-82 напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не должны превышать значений, указанных ниже в таблице 3.

Таблица 3 – Допустимые значения напряжений и токов, проходящих через тело человека

Род тока	U, В	I, мА
	Не более	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4
Постоянный	8,0	1,0

Стоит отметить, что значения напряжения прикосновения и токи приведены при продолжительности воздействия не более 10 мин в сутки и установлены исходя из реакции ощущения.

Также табличные значения напряжения и токи для лиц, выполняющих работу в условиях высоких температур (выше 25 градусов Цельсия) и влажности (относительная влажность более 75 %), должны быть уменьшены в три раза.

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме бытовых электроустановок напряжением до 1000 В и частотой 50 Гц не должны превышать значений, указанных в таблице ниже.

Таблица 4 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов

Продолжительность действия t, с	Предельно допустимое значение напряжения прикосновения U, В
До 0,1	500
0,2	400
0,5	200
0,7	130
1,0	100
Св. 1,0 до 5,0	65

Движущиеся твердые, жидкие или газообразные объекты, наносящие удар по телу работающего. Так как компрессорный агрегат предназначен для перемещения и повышения давления газа до давления примерно в 3,5 МПа, то существуют определенные риски, связанные с работами в машинном зале. Поэтому любые газоопасные работы должны проводиться в строгом соответствии с Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности «Правила безопасного ведения газоопасных, огневых и ремонтных работ».

Для подготовки объекта к проведению газоопасных работ должны быть приняты меры по уменьшению степени опасности газоопасной работы посредством снятия давления с оборудования, работающего под избыточным давлением, удаления опасных веществ, исключения их поступления из смежных технологических систем, исключения возможных источников искрообразования.

Чрезмерное загрязнение воздушной среды в зоне дыхания. Применяемые в турбокомпрессорном агрегате концевые лабиринтные уплотнения полностью исключить утечки технологических газов не могут, поэтому в рабочую зону так или иначе происходит выброс газов.

Содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны не должно превышать предельно допустимых концентраций (ПДК), используемых при проектировании производственных зданий, технологических процессов, оборудования, вентиляции, для контроля за качеством производственной среды и профилактики неблагоприятного воздействия на здоровье работающих.

Содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны подлежит систематическому контролю для предупреждения возможности превышения предельно допустимых концентраций – максимально разовых рабочей зоны (ПДК_{мр.рз}) и среднесменных рабочей зоны (ПДК_{сс.рз}).

Для каждого производственного участка должны быть определены вещества, которые могут выделяться в воздух рабочей зоны. При наличии в

воздухе нескольких вредных веществ контроль воздушной среды допускается проводить по наиболее опасным и характерным веществам, устанавливаемым органами государственного санитарного надзора.

В данном случае наибольшую опасность представляют этилен и пропилен. Согласно приложению 2 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны ГОСТ 12.1.005-88 величина ПДК для этилена и пропилена составляет 100 мг/м³. Этилен и пропилен относятся к 4 классу опасности. Для поддержания чистоты воздуха рабочей зоны в машинном зале организована приточно-вытяжная вентиляция.

6.2.2 Расчет требуемого воздухообмена в машинном зале

Требуемый воздухообмен определяется по формуле:

$$L = \frac{1000G}{x_B - x_H} \quad (42)$$

где L , м³/ч – требуемый воздухообмен;

G , г/ч – количество вредных веществ, выделяющихся в воздух помещения;

x_B , мг/м³ – предельно допустимая концентрация вредности в воздухе рабочей зоны помещения, согласно ГОСТ 12.1.005-88;

x_H , мг/м³ – максимально возможная концентрация той же вредности в воздухе населенных мест по СанПиН 1.2.3685-21.

Герметичность оборудования со временем уменьшается. Истечение газа через неплотности можно рассматривать как истечение через небольшие отверстия. Количество вредных веществ можно определить по следующей формуле:

$$G = kcv \sqrt{\frac{M}{T}} \quad (43)$$

где k – коэффициент, учитывающий повышение утечки от износа оборудования ($k = 1 \div 2$); c – коэффициент, учитывающий влияние давления газа в аппарате; v – внутренний объем аппарата и трубопроводов,

находящихся под давлением, м³; M – молекулярный вес газов, находящихся в оборудовании; T – абсолютная температура газов в оборудовании, К.

Таблица 5 – Значения коэффициента, учитывающего влияние давления газа в оборудовании

Давление p , атм	до 2	2	7	17	41	161
c	0,121	0,166	0,182	0,189	0,25	0,29

В данном случае система заполнена пирогазом (многокомпонентный газ, основные компоненты: этилен, метан, пропилен и др.). Внутренний объем оборудования $v_0 = 17$ м³, внутренний объем трубопроводов $v_{тр} = 15$ м³. Рабочее давление в оборудовании $p_0 = 3,6$ МПа, давление в трубопроводах $p_{тр} = 1$ МПа. Абсолютная температура газа в оборудовании в среднем $T_0 = 371,15$ К, в трубопроводах температура газа равна ориентировочно $T_{тр} = 341,15$ К.

Определим величины утечек пирогаза из оборудования и трубопроводов. Принимаем $k = 1,5$, $c_0 = 0,236$, $c_{тр} = 0,184$, молярная масса пирогаза $M = 26$ г/моль. Тогда утечка газа из оборудования составит:

$$G_0 = kc_0v_0\sqrt{\frac{M}{T_0}} = 1,5 \cdot 0,236 \cdot 17 \cdot \sqrt{\frac{26}{371,15}} = 1590 \text{ г/ч.}$$

Утечка газа из трубопроводов составит:

$$G_{тр} = kc_{тр}v_{тр}\sqrt{\frac{M}{T_{тр}}} = 1,5 \cdot 0,184 \cdot 15 \cdot \sqrt{\frac{26}{341,15}} = 1140 \text{ г/ч.}$$

Суммарные утечки газа из оборудования и трубопроводов составят:

$$G = G_0 + G_{тр} = 1,59 + 1,14 = 2730 \text{ г/ч} \quad (44)$$

Согласно таблице 1 ГОСТ 12.1.005-88 ПДК этилена в воздухе рабочей зоны составляет $x_B = 100$ мг/м³, а согласно СанПиН 1.2.3685-21 ПДК этилена в воздухе населенных мест не должна превышать $x_H = 3$ мг/м³. Тогда потребный воздухообмен составит:

$$L = \frac{1000G}{x_B - x_H} = \frac{1000 \cdot 2730}{100 - 3} = 28144 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Рассчитаем кратность воздухообмена в помещении с габаритами 65×20×12 метров (Д×Ш×В):

$$n = \frac{L}{V} = \frac{28144}{15600} = 1,8 \text{ раз в час} \quad (45)$$

Это означает, что при данных габаритах помещения потребуется полное обновление воздуха рабочей зоны почти два раза в час.

6.3 Пожарная безопасность

6.3.1 Категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности

Согласно таблице 1 СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» существуют следующие категории помещений:

А – повышенная взрывопожароопасность;

Б – взрывопожароопасность;

В1-В4 – пожароопасность;

Г – умеренная пожароопасность;

Д – пониженная пожароопасность.

Машинный зал относится к помещениям категории А, так как в нем находится компрессор, который работает с большими объемами горючего газа, утечка которого может привести к образованию взрывоопасной парогазовоздушной смеси.

6.3.2 Мероприятия по обеспечению пожарной безопасности

Обеспечение пожарной безопасности на промышленном объекте согласно ГОСТ 12.1.004-91 достигается применением:

системы по предотвращению пожара;

системы по противопожарной защите;

организационно-технических мероприятий по обеспечению пожарной безопасности.

6.3.2.1 Системы по предотвращению пожара

В машинном зале применяются следующие способы предотвращения пожара:

установлены датчики ДВК и организована приточно-вытяжная вентиляция, также имеется аварийная вентиляция, которая срабатывает при активации датчиков ДВК;

компрессорный агрегат оснащен системой противоаварийной защиты и необходимым количеством блокировок для обеспечения нормального режима работы;

компрессорный агрегат находится в отдельном здании – в машинном зале;

оперативное отсечение аварийного участка достигается применением запорной арматуры с электроприводом.

6.3.2.2 Системы противопожарной защиты

Противопожарная защита достигается:

применением средств пожаротушения и соответствующих видов пожарной техники;

применением автоматических установок пожарной сигнализации и пожаротушения;

организацией с помощью технических средств, включая автоматические, своевременного оповещения и эвакуации людей;

устройством аварийного отключения и переключения установок и коммуникаций;

обеспечением возможности беспрепятственного движения людей по эвакуационным путям.

6.3.2.3 Организационно-технические мероприятия по обеспечению пожарной безопасности

Организационно-технические мероприятия должны включать:

разработку мероприятий по действиям администрации, рабочих, служащих и населения на случай возникновения пожара и организацию эвакуации людей (в рабочей инструкции);

изготовление и применение средств наглядной агитации по обеспечению пожарной безопасности;

организацию обучения работающих правилам пожарной безопасности на производстве, а населения – в порядке, установленном правилами пожарной безопасности соответствующих объектов пребывания людей;

разработку и реализацию норм и правил пожарной безопасности, инструкций о порядке обращения с пожароопасными веществами и материалами, о соблюдении противопожарного режима и действиях людей при возникновении пожара (в рабочей инструкции);

паспортизацию веществ, материалов, изделий, технологических процессов, зданий и сооружений объектов в части обеспечения пожарной безопасности.

6.3.3 Основные средства пожаротушения, применяемые на установке

Установка компримирования и разделения пирогаза оснащена автоматической установкой пенотушения, которая состоит из:

- сети трубопроводов с установленными на них оросителями;
- системы обнаружения пожара;
- узла управления установкой пожаротушения;
- насосной станции установки автоматического пенотушения;
- источника водоснабжения из 4-х резервуаров объемом 100 м³;
- технические средства для сигнализации и управления установкой пожаротушения.

Система обнаружения пожара включает в себя чувствительные элементы на повышение температуры - легкоплавкие замки сплинкеров ОПСР и тросовые замки 2-3Т на компрессии.

Узлы управления системой автоматического пожаротушения расположены на эстакадах в местах подключения полустационарных установок пожаротушения к сети трубопроводов.

Полустационарная установка пожаротушения включает в себя сеть трубопроводов с установленными на них стояками и соединительной головкой. Стояки-краны укомплектованы генераторами пены ГПС-600 с рукавами длиной 20 м.

Для управления полустационарной установкой предусмотрены кнопочные пускатели, установленные у стояков и в операторной. Местный пуск насосов производится со щита управления, расположенного в насосной станции.

Сигнализация о срабатывании системы автоматического пожаротушения и состоянии готовности основных средств пожарной защиты выведена на центральный пульт управления (ЦПУ).

Помимо автоматической системы пенотушения на установке расположены пожарные гидранты, в машинном зале есть ящики с песком и огнетушители порошковые ОП-10.

6.3.4 Наиболее вероятные причины возникновения взрывов и пожаров на установке

Технологический процесс на установке компримирования и разделения пирогаза связан с переработкой больших количеств легковоспламеняющихся газов и других веществ, способных при взаимодействии с кислородом воздуха взрываться и гореть, поэтому производство относится к взрывопожароопасным.

Ситуации взрывов и пожаров могут возникнуть:

при разгерметизации трубопроводов топливного газа, водорода, метана, этана, пропана, пропилена и других фракций;

при неисправной работе электрооборудования;

при повышенном трении и вибрации движущихся частей и механизмов.

6.4 Экологическая безопасность

Атмосфера. Разработанное решение по модернизации уплотнительного узла центробежного компрессора направлено на, прежде всего, повышение надежности данного узла. Лабиринтное концевое уплотнение предназначено для минимизации утечек рабочего газа в рабочую зону. Однако при стечении некоторых обстоятельств утечка метана или азота в машинный зал не исключена, поэтому требуется обеспечить машинный зал приточной и вытяжной вентиляцией, аварийной вентиляцией и датчиками сигнализаторами довзрывоопасной концентрации (ДВК). Также для такого помещения будет особое требование к устройствам, применяемым в таком помещении - все устройства должны быть взрывозащищенного исполнения. Так как образование искры может привести к взрыву и последующей разгерметизации оборудования.

Лабиринтные уплотнения направлены на сокращение утечек рабочего газа в атмосферу, но полностью их не исключают, поэтому минимальные выбросы азота в атмосферу все же присутствуют. Основным возможным загрязнителем помещения машинного зала является пиролизный газ, который имеет многокомпонентный состав, но большую часть которого составляют такие вещества как этилен (около 30 %), метан (около 16 %), пропилен (около 14 %), этан (около 7 %), бензол (около 7 %) и др.

Литосфера. Воздействие турбокомпрессорного агрегата на литосферу минимально.

Возможную угрозу может представлять лишь компрессорное масло, розлив которого на почву может негативно повлиять на почву, но масло, как правило, хранится в специально оборудованном помещении.

Для нормальной работы компрессорного агрегата необходима система смазки, которая состоит из агрегата смазки, аварийного бака, напорных и сливных трубопроводов. Рабочим веществом в таких системах является масло. Компрессорное масло требует периодической замены, так как с течением времени оно вырабатывает свои свойства. Для периодической замены масла

на предприятии предусмотрены места хранения неиспользованного и отработанного масел. К таким помещениям предусматриваются особые требования, которые отражены в своде правил СП 155.13130.2014 "Склады нефти и нефтепродуктов".

Гидросфера. Для обеспечения нормальной работы оборудования на производстве используется техническая вода. В основном вода применяется в теплообменном оборудовании.

Для соблюдения требований нормативных актов, регулирующих отношения в области охраны водных ресурсов, на производстве используются отдельные системы сбора хим. загрязненной и хозяйственно-бытовой воды.

6.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

При испытаниях и эксплуатации лабиринтного уплотнения в составе центробежного компрессора наиболее уместны чрезвычайные ситуации техногенного характера происхождения. Это объясняется тем, что зачастую компрессорный агрегат представляет собой сложную систему, включающую довольно много элементов. Чем сложнее система, тем вероятнее выход ее из строя.

В ходе анализа возможных рисков, связанных с работой конкретно системы лабиринтных уплотнений с применением буферного и затворного газов, был выявлен наиболее значимый и вероятный. Риск связан с прекращением подачи азота (затворного газа) в камеры подачи уплотнения. Это грозит попаданием метана (буферного газа) в машинный зал, что может привести к образованию взрывоопасной смеси в помещении. Также нежелательным событием будет попадание метана в коллектор азота. Для снижения вероятности возникновения такого события были предложены следующие меры:

- установка расходомера на линии подачи азота после регулирующего клапана;
- установка датчика давления в коллекторе подачи азота с сигнализацией по минимально допустимому значению;

- установка газоанализатора в машинном зале над компрессором с сигнализацией на превышение допустимой концентрации паров метана;
- обеспечение требуемого воздухообмена для приточно-вытяжной и аварийной вентиляций;
- обеспечение линии подачи азота обратным клапаном.

Заключение

Рассмотренные в разделе правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности разработанного решения и отрасли его применения позволяют обратить внимание на такие важные аспекты разработки, как охрана труда, промышленная безопасность и экология.

Анализ опасных и вредных факторов дает представление об особенностях технологической среды, в которой эксплуатируется разработанное решение. Анализ возможных чрезвычайных ситуаций помогает глубже оценить предложенное решение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертации был выполнен аналитический расчет величины протечек для системы концевых лабиринтных уплотнений с подведением буферного и затворного газа в составе трехкорпусного многоступенчатого центробежного компрессора. Расчет осуществлялся для лабиринтных уплотнений с радиальными зазорами в 0,35 и 0,5 мм и радиусами скругления гребней 0,2, 0,5 и 1,5 мм.

В результате проведения расчетов выяснилось, что, при использовании данной методики расчетов, величина протечки через лабиринтные участки с большим радиусом скругления гребней была больше, чем при аналогичных условиях, но с меньшими радиусами скругления. Для радиального зазора равного 0,35 мм разница в расходе газа через участок уплотнения с радиусом скругления гребней в 0,2 мм по сравнению с тем же участком, но со скруглением в 1,5 мм, составила около 52 %. Меньшая динамика роста 23% наблюдалась при радиальном зазоре равном 0,5 мм при тех же значениях радиусов скругления гребней

Разработанная система уплотнений позволит исключить образование отложений в участках лабиринтных уплотнений, что положительно скажется на межремонтном периоде компрессора. Модернизация узла уплотнений компрессора в комплексе с другими работами на всем производстве позволит увеличить межремонтный период с двух до четырех лет, тем самым сокращая затраты на проведение капитального ремонта и повышая количество продукции. Экономический эффект от проведения ремонта оценивается в 340 часов и 180147,62 руб. за 4 года.

Использование модернизированной системы уплотнений в центробежном компрессоре обеспечивает утечку азота в машинный зал не более 18,6 м³/ч при радиальном зазоре 0,5 мм и радиусе скругления гребней 1,5 мм. Использование в машинном зале приточно-вытяжной системы вентиляции позволит обеспечить надлежащий уровень воздухообмена, исключая образование в рабочей зоне вредных и опасных концентраций газа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Хисамеев И.Г., Максимов В.А., Баткис Г.С., Гузельбаев Я.З. Проектирование и эксплуатация промышленных центробежных компрессоров. – Казань: Изд-во «ФЭН», 2010. – 671 с.

2 РТМ 108.020.33-86 Уплотнения лабиринтные стационарных паровых и газовых турбин и компрессоров. Проектирование и расчет. – М.: НПО ЦКТИ, 1988. – 70 с.

3 Васильцов Э.А. Бесконтактные уплотнения. – Л.: Машиностроение, 1974. – 160 с.

4 Макаров А.А., Зайцев Н.Н. Инженерные и теоретические задачи применения лабиринтных уплотнений в высокоскоростных роторных машинах // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2015. - № 42. – С.61-81.

5 Беллауар А., Исследование протечек газа в лабиринтном уплотнении газоперекачивающих агрегатов // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2010. № 2. – С 107-110.

6 Кондаков Л.А., Голубев А.И., Овандер В.Б., и др. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.

7 ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2019.

8 ГОСТ 12.1.012-2004 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вибрационная безопасность. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2010.

9 ГОСТ 12.1.019-2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты (с Поправкой). – М.: Стандартинформ, 2019.

10 ГОСТ 12.4.021-75 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы вентиляционные. Общие требования (с Изменением N 1)). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

11 ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1). – М.: Стандартинформ, 2008.

12 ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

13 СП 155.13130.2014 Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности (с Изменением N 1). – М.: МЧС России, 2014.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Исходные данные по составу газа

Таблица А.1 – Состав газа

Компонент	Молярная масса, г/моль	Молярная доля, %
Водород	2	1,21
Сернистый водород	34,082	0,1
Окись углерода	28,01	0,25
Двуокись углерода	44,01	0,11
Метан	16,32	16,32
Ацетилен	26,038	0,48
Этилен	28,05	30,42
Этан	30,07	7,26
Пропадиен-1,2	40,031	0,58
Пропилен	42,081	14,62
Пропан	44,1	0,48
Бутадиен-1,3	54,09	4,15
Бутен-1	56,11	4,63
Бутан	58,12	0,48
Пентан	72,15	4,39
Гексан	86,178	1,05
Бензол	78,11	6,84
Гептан	100,21	0,59
Метилбензол	92,14	3,78
Октан	114,229	0,21
1,3-диметилбензол	106	1,02

Продолжение таблицы А.1

Этилбензол	106,167	0,28
1,2-диметилбензол	106	0,4
Пропилбензол	120,2	0,23

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

General information about end seals used in centrifugal compressors

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ05	Михеев Тимофей Александрович		

Консультант школы отделения (НОЦ): ИШПР, ОНД

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Валитова Елена Юрьевна	к.п.н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы: ШБИП, ОИЯ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Матвеевко Ирина Алексеевна	д.ф.н.		

1 General information about end seals used in centrifugal compressors

1.1 Purpose and classification of seals

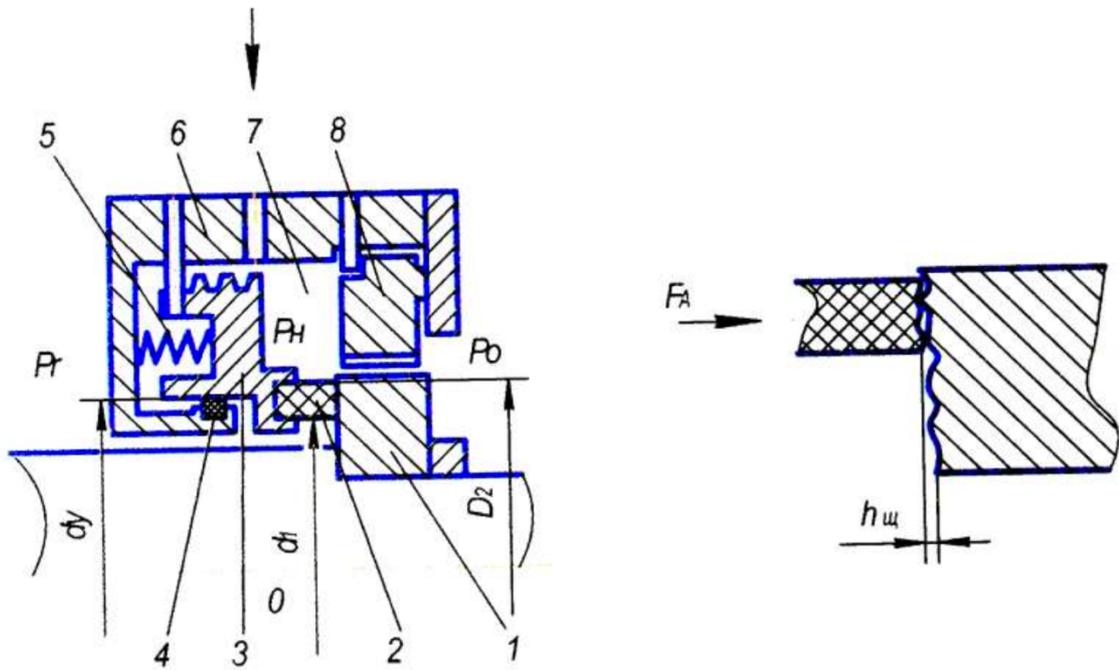
A mechanical seal is a device that helps join systems or mechanisms together by preventing leakage (e.g. in a pumping system), containing pressure, or excluding contamination.

1.1.1 Contact seals

Contact seals is sealing systems in which the sealing gap between two sealing surfaces is sealed to a greater or lesser extent by a sealing element that touches both surfaces. The most typical representatives of contact seals are gland seals, lip seals and mechanical seals.

Among contact seals, only mechanical seals with barrier liquid have found application in centrifugal compressors.

The friction pair in a mechanical seal with barrier liquid consists of: an axially movable element, a graphite ring and a thrust disc. The barrier liquid is mineral oil, which is supplied at a pressure of 0.03-0.5 MPa higher than the pressure of the gas being sealed and removes the heat flow from the friction pair.



1 - thrust disk; 2 - sealing graphite ring; 3 - axially movable element (sleeve); 4 - rubber sealing ring; 5 - spring; 6 - body; 7 - sealing oil cavity; 8 - floating sealing ring

Figure 1 - Scheme of a mechanical seal with barrier liquid

Mechanical seals are best suited for high pressure applications where gas leakage is to a minimum. Such operating conditions are typical for main gas pipelines, chemical and oil refining industries, as well as refrigeration units of various capacities.

1.1.2 Non-contact seals

Non-contact seals are designed to seal without any physical contact between the rotating and stationary elements. The sealing action of a non-contact seal is based on the energy loss of the working substance during the passage of gaps and chambers formed by rotating and stationary elements.

Labyrinth seals and dry gas seals are widely used in compressor designs.

1.2 Dry gas seals

Dry gas seals (DGS) are currently quite common both in the modernization of end seals on already operating compressors and in the manufacture of new compressors.

Grooves or machined ramps on the seal direct gas inward toward the non-grooved portion. The action of the gas flowing across the seal generates pressure that keeps a minute gap, therefore optimizing fluid film stiffness and providing protection against face contact.

The use of these seals in centrifugal compressors has increased significantly in the last two decades because they eliminate contamination and do not use lubricating oil. Non-contacting dry gas seals are often used on compressors for pipelines, off-shore applications, oil refineries, petrochemical and gas processing plants.

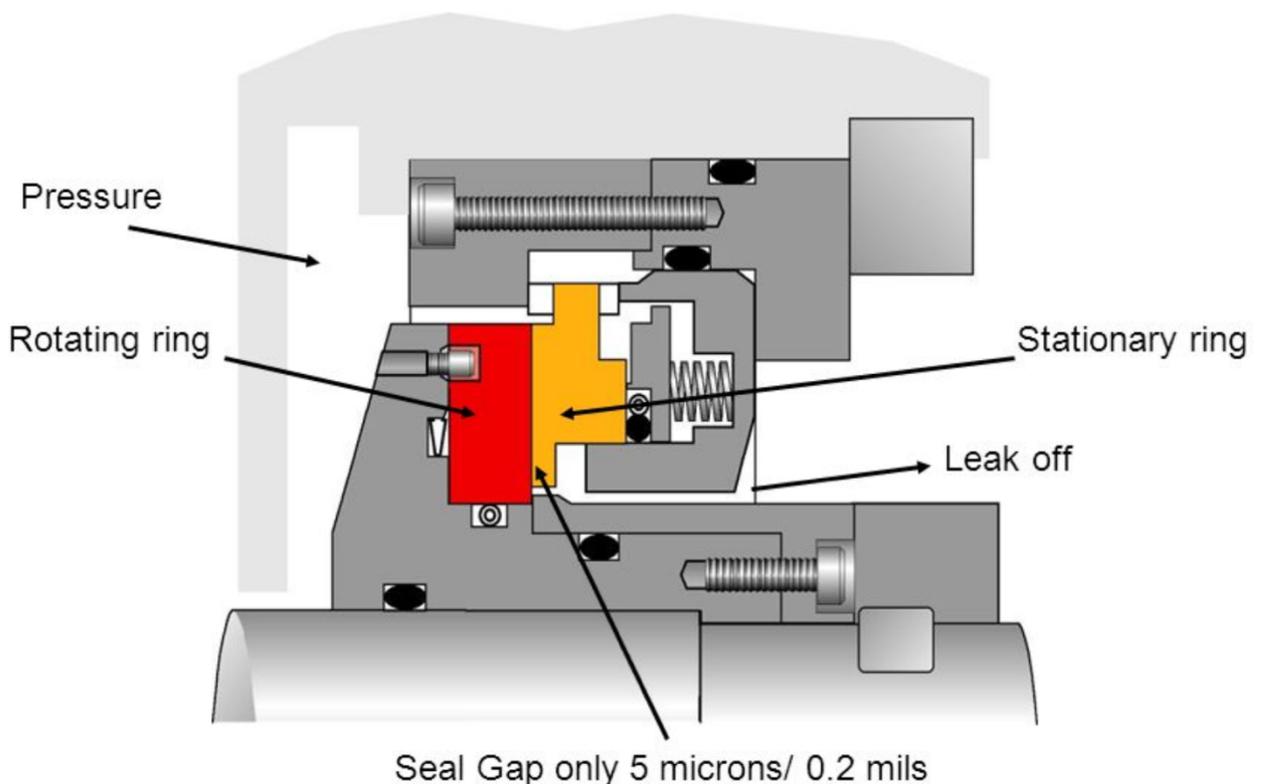


Figure 1.1 – Principle of operation

Microgrooves are applied on the sealing surface of the rotating ring, due to which gas-dynamic pressure is created and maintained in the gap. There are two types of grooves profile – reversible (bidirectional) and non-reversible (unidirectional). The requirement for the possibility of rotation in the opposite direction may be due to the peculiarities of the starting operations of the compressor.



Left – unidirectional grooves profile; right – bidirectional grooves profile

Figure 1.2 – Type of grooves profile in a rotating ring

Depending on the operating conditions, DGS can have several types: single seal, tandem seal, double opposed seal, triple seal. The main difference between these types lies in the sealing properties. So, for example, a single seal is suitable when using neutral gases, the leakage of which in a minimum amount to the atmosphere is acceptable. A further increase in the number of sections (double, triple) seals and from the mutual arrangement (tandem) is due to more stringent safety requirements for the operation of compressors operating on explosive and toxic gases.

2 Labyrinth seals as part of a centrifugal compressor

2.1 The principle of operation of the labyrinth seal

Labyrinth-type seals are used to minimize recirculation losses within the compressor. A labyrinth seal consists of a number of teeth (knife-edges) that can be either stationary or rotating. Stationary labyrinth teeth are fitted to the compressor stationary components very close to the compressor rotor (see Fig. 1.3).

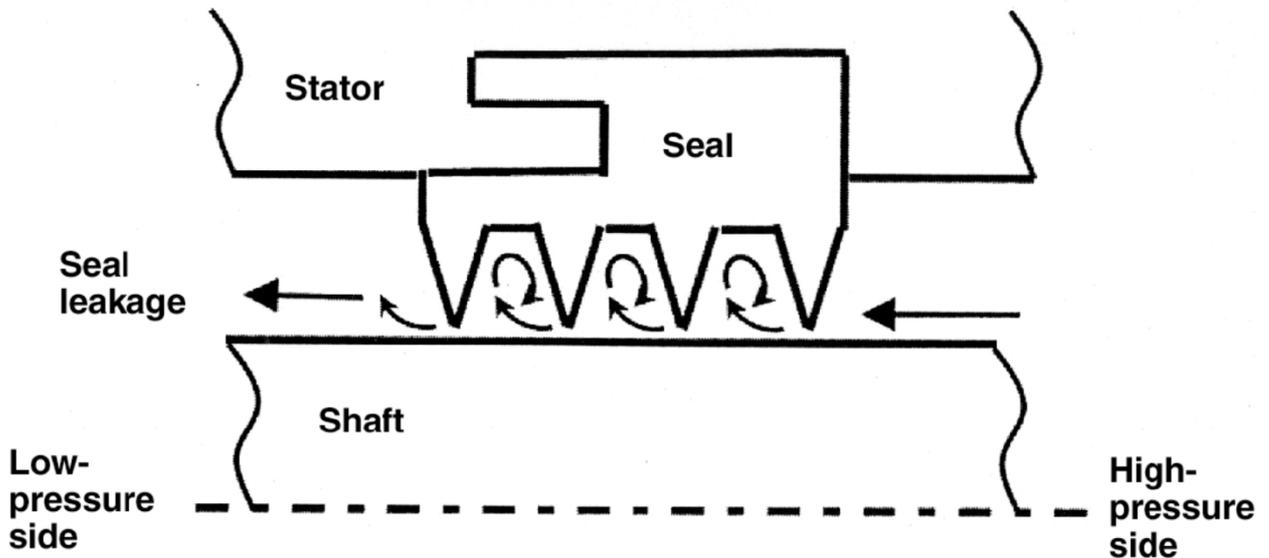


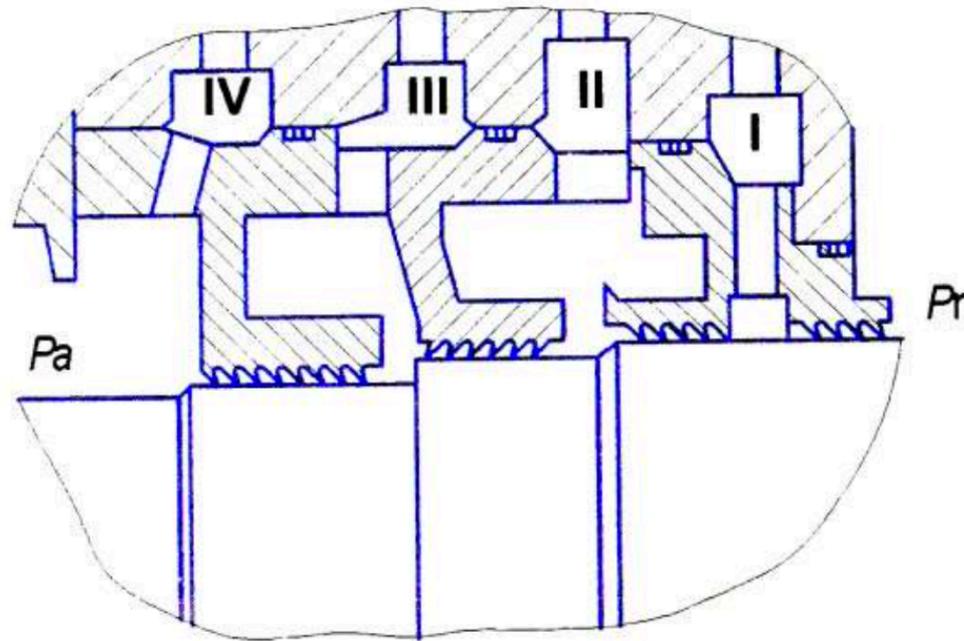
Figure 1.3 – Labyrinth seal

Sealing action is the result of flow resistance caused by repeated throttling across the labyrinth teeth. The kinetic energy arising from the difference in potential energies of the gas is converted into thermal energy due to the occurrence of a friction force between the surface of the elements forming the labyrinth seal and the gas. The area of the seal that forms the constriction is called a throttle. The labyrinth seal is formed by the alternation of such sections.

Labyrinth seals are designed so that one of the two adjacent parts (labyrinth teeth and rotor) is relatively soft. The softer material yields on contact without damage to the harder material. Compressor manufacturers select labyrinth seal clearances that are as tight as practical to minimize leakage while avoiding heavy rubbing with the rotor.

2.4 Labyrinth seal systems with barrier gas supply

Labyrinth seal systems with barrier gas supply are used when the compressor is working with explosive gases. A so-called sealing or barrier gas is then introduced into the sealing system, which seals the working gas and prevents it from penetrating to the outside. Figure 1.4 shows a diagram of a labyrinth seal system using barrier gas.



I - leakage chamber; II - chamber for removing the mixture of working and sealing (barrier) gas; III – barrier (barrier) gas supply chamber; IV - barrier gas removal chamber

Figure 1.4 - Scheme of a labyrinth seal with a barrier gas supply

The barrier gas is supplied through chamber III and then diverges into chambers II and IV. The barrier gas pressure is slightly higher than the pressure of the working gas, and therefore the working gas is blocked. Through chamber II, the mixture of two gases is removed from the compressor housing, and excess barrier gas is removed through chamber IV. Leakage chamber I is connected to the first suction stage of the compressor to equalize the pressures before the seals of the entire compressor plant. This allows the use of a single barrier gas supply system for all compressor seals.

3 Modernization of end labyrinth seals as part of a multistage centrifugal compressor

3.1 About the compressor package

3.1.1 The place of the compressor unit in the technological chain

The compressor unit is located at the pyrogas compression and separation unit. This unit is designed for stepwise compression of pyrogas for the separation of monomers from it - ethylene and propylene, as well as for purification from hydrogen and methane.

3.1.2 Description of the compressor package

The compressor unit consists of a drive - a steam turbine and the centrifugal compressor itself.

The steam turbine is single-casing, condensing, with one controlled steam extraction. The main characteristics of the turbine:

- rated power 28100 kW;
- nominal speed 5660 rpm;
- turbine operating speed range 5000-5885 rpm.

The turbine is driven by steam, which is obtained by cooling hot pyrogas with water in quench exchanger. The steam entering the turbine has a nominal pressure of 110 kgf/cm² and a nominal temperature of 540 °C.

The drive turbine shaft is connected to the compressor shaft by means of a special gear coupling and torsion bar. On the side of the steam turbine there is a ring gear, which, when the turbine stops, engages with the barring gear.

The five-stage flow path is integrated into a three-casing radial turbocharger. Compression housings have a horizontal split plane. Figure 8 shows the compressor unit installed in the machine room.

The compressor has the following characteristics (working fluid - pyrogas):

- suction flow - 131925 kg / h;
- pressure at the suction pipe - 1.25 kgf / cm²;
- pressure at the discharge pipe - 41.2 kgf / cm²;
- temperature at the suction pipe - 40 °C;

- temperature at the discharge pipe - 117 °C.

Pyrogas sequentially passes through each of the five stages of compression, while after each stage, before entering the next gas, it is cooled in intermediate air-type gas coolers.