

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

Инженерная школа природных ресурсов (ИШПР)
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 «Нефтегазовое дело»
 Профиль «Надежность и безопасность объектов транспорта и хранения углеводородов»
 Отделение нефтегазового дела

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка мероприятий по повышению надежности технологического оборудования компрессорной станции

УДК 622.279.51-027.45

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ01	Винокуров Тимофей Сергеевич		

Ф

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОНД	Шадрина Анастасия Викторовна	д.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОНД	Шарф И.В.	д.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД	Сечин А.А.	к.т.н., доцент		

Консультант-лингвист

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ	Айкина Т.Ю.	к.ф.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОНД ИШПР	Шадрина А.В.	д.т.н., доцент		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

21.04.01 Нефтегазовое дело Образовательная программа Надежность и безопасность объектов транспорта и хранения углеводородов

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, выработать командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен решать производственные и (или) исследовательские задачи на основе фундаментальных знаний в нефтегазовой области
ОПК(У)-2	Способен осуществлять проектирование объектов нефтегазового производства
ОПК(У)-3	Способен разрабатывать научно-техническую, проектную и служебную документацию, оформлять научно-технические отчеты, обзоры, публикации, рецензии
ОПК(У)-4	Способен находить и перерабатывать информацию, требуемую для принятия решений в научных исследованиях и в практической технической деятельности
ОПК(У)-5	Способен оценивать результаты научно-технических разработок, научных исследований и обосновывать собственный выбор, систематизируя и обобщая достижения в нефтегазовой отрасли и смежных областях
ОПК(У)-6	Способен участвовать в реализации основных и дополнительных профессиональных образовательных программ, используя специальные научные и профессиональные знания
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способность разрабатывать методическое обеспечение для первичной и периодической подготовки и аттестации специалистов в области трубопроводного транспорта углеводородов
ПК(У)-2	Способность анализировать и обобщать данные о работе технологического оборудования, осуществлять контроль, техническое сопровождение и управление технологическими процессами в трубопроводном транспорте нефти и газа
ПК(У)-3	Способность оценивать экономическую эффективность инновационных решений в области трубопроводного транспорта углеводородов
ПК(У)-4	Способность обеспечивать безопасную и эффективную эксплуатацию и работу технологического оборудования нефтегазовой отрасли
ПК(У)-5	Способность участвовать в управлении технологическими комплексами, принимать решения в условиях неопределенности
ПК(У)-6	Способность применять полученные знания для разработки и реали-

	зации проектов, различных процессов производственной деятельности на основе методики проектирования в нефтегазовой отрасли, а также инструктивно-нормативных документов
ПК(У)-7	Способность применять современные программные комплексы для проектирования технических устройств, аппаратов и механизмов, технологических процессов в соответствии с выбранной сферой профессиональной деятельности

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

Инженерная школа природных ресурсов (ИШПР)
Направление подготовки (специальность) 21.04.01 «Нефтегазовое дело»
Профиль «Надежность и безопасность объектов транспорта и хранения углеводородов»
Отделение нефтегазового дела

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП ОНД ИШПР

(Подпись) _____
(Дата) А.В. Шадрина
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ01	Винокуров Тимофею Сергеевичу

Тема работы:

Разработка мероприятий по повышению надежности технологического оборудования компрессорной станции

Утверждена приказом директора (дата, номер)

08.02.2022 г. № 39-42/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(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.).

Объектом исследования является надежность технологического оборудования КС

<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>	<ul style="list-style-type: none"> • Провести анализ технического состояния единой системы газоснабжения; • Провести оценку надежности технологического оборудования КС; • Разработать рекомендаций по повышению надежности КС; • Рассмотреть конструкционные решения при проектировании рабочего колеса центробежного нагнетателя и определить прочностные качества; • Определить экономическую эффективность проекта по внедрению турбодетандерной установки
--	---

<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Рисунки и таблицы</p>
---	--------------------------

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Шарф Ирина Валерьевна, профессор, д.э.н
«Социальная ответственность»	Сечин Андрей Александрович, доцент, к.т.н.
Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШПИБ	Айкина Татьяна Юрьевна, доцент, к.т.н.

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

Разделы на русском языке: реферат, введение, заключение, разделы 1-5, приложения Б,В.
Разделы на английском языке: приложение А.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОНД	Шадрина Анастасия Викторовна	д.т.н, доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ01	Винокуров Тимофей Сергеевич		

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

Инженерная школа природных ресурсов (ИШПР)
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 «Нефтегазовое дело»
 Профиль «Надежность и безопасность объектов транспорта и хранения углеводородов»
 Отделение нефтегазового дела
 Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2021/2022 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.01.2022	Обзор литературы	10
28.02.2022	Анализ технического состояния современного парка оборудования единой системы газоснабжения	10
15.03.2022	Исследование методологии оценки показателей надежности объектов нефтегазотранспортной системы.	15
21.04.2022	Разработка мероприятий по повышению надежности технологического оборудования КС	15
04.05.2022	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
12.05.2022	Социальная ответственность	10
16.05.2022	Раздел на иностранном языке	10
20.05.2022	Заключение	10
27.05.2022	Презентация	5
	ИТОГО:	100

Составил:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОНД	Шадрина Анастасия Викторовна	д.т.н, доцент		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОНД ИШПР	Шадрина А.В..	д.т.н, доцент		

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

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ01	Винокуров Тимофей Сергеевич

Школа	Инженерная школа природных ресурсов	Отделение школы (НОЦ)	Отделение нефтегазового дела
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	21.04.01 Нефтегазовое дело. Надежность и безопасность объектов транспорта и хранения углеводородов

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

1. <i>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 мероприятий по внедрению турбодетандерных установок на газораспределительной станции собственных нужд компрессорной станции.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	СТО Газпром 2- 1.20-601-2011 «Методика расчета эффекта энергосбережения топливно-энергетических ресурсов, расходуемых на собственные технологические нужды магистрального транспорта газа»
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	1. Налоговый кодекс Российской Федерации. ФЗ-213 от 24.07.2009 (в редакции от 26.03.2022 №67-ФЗ) 2. Постановление Правительства РФ от 01.01.2002 №1 (ред. от 27.12.2019) «О Классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы»

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Обоснование перспективности внедрения турбодетандерной установки на газораспределительной станции собственных нужд компрессорной станции.
2. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Расчет доходов и затрат при использовании турбодетандерной установки
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Оценка экономической эффективности от реализации энергосбережения электроэнергии посредством монтажа турбодетандерной установки

Перечень графического материала

1. Схема выполнения проекта

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
2БМ01	Винокуров Тимофей Сергеевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 2БМ01		ФИО Винокуров Тимофей Сергеевич	
Школа	Инженерная школа природных ресурсов	Отделение (НОЦ)	Отделение нефтегазового дела
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	21.04.01 Нефтегазовое дело. Надежность и безопасность объектов транспорта и хранения углеводородов

Тема ВКР:

Разработка мероприятий по повышению надежности технологического оборудования компрессорной станции

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

Объект исследования: технологическое оборудование КС
 Область применения: компрессорные станции МГ
 Рабочая зона: производственный объект
 Размеры производственного объекта: 300×180
 Количество и наименование оборудования рабочей зоны: ГПА, АВО, БФС, краны шаровые, фильтры, воздухоотделители.
 Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: компримирование газа, монтажные работы

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения:

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

1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)
2. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 "Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов"

2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:

- Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов

Вредные производственные факторы:
 – превышение шума
 – превышение уровней вибрации
 – отклонение показателей микроклимата
 – недостаточная освещенность рабочей зоны
 – повышенная запыленность и загазованность рабочей зона
 Опасные производственные факторы:
 – движущиеся машины и механизмы производственного оборудования
 – электрический ток
 – оборудование и трубопроводы, работающие под давлением

3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения:

Воздействие на литосферу: загрязнение почвы производственными отходами

– расчет удельных выбросов стравливаемого газа при остатке ГПА	Воздействие на гидросферу: загрязнение сточными водами и производственных отходов Воздействие на атмосферу выбросы природного газа, сжигание отходов производства, выхлопные газы ГТУ, выбросы пыли и токсичных газов
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения.	Возможные ЧС: пожар на объекте, авария на объекте, попадание молнии. Наиболее типичная ЧС: пожар на объекте
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ01	Винокуров Тимофей Сергеевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 141 с., 36 рис., 23 табл., 58 источников, 3 прил.

Ключевые слова: компрессорная станция, надежность, газоперекачивающий агрегат, композитные материалы, турбодетандерная установка.

Объектом исследования является (ются) надежность технологического оборудования компрессорной станции.

Цель работы – проведение оценки параметров надежности компрессорной станции и разработка мероприятий по повышению ее надежности.

В процессе исследования проводились оценка надежности компрессорной станции, разработка мероприятий по повышению показателей надежности технологического оборудования, сравнение и определение НДС рабочего колеса ЦБН из композитного материала и стали марки 30ХН2МФА, рассчитаны НДС при использовании метода фрезерования при появлении дефектов на периферии диска РК и расчет экономической эффективности при применении турбодетандерных установок.

В результате исследования был проведен анализ состояния современного парка оборудования ЕСГ, разработаны комплекс мероприятий с применением современных технологий, позволяющих провести количественную оценку и обеспечивать бесперебойную работоспособность КС.

Область применения: компрессорные станции магистрального транспорта газа.

Экономическая эффективность/значимость работы применения турбодетандерных установок позволяет экономить 39,9 МВт·ч ежегодно, что эквивалентно 193,515 тыс. руб.

В будущем планируется разработать систему по мониторингу прогнозирования отказов для перехода от планово-предупредительной формы обслуживания на техническое обслуживание по фактическому состоянию.

					<i>Разработка мероприятий по повышению надежности технологического оборудования компрессорной станции</i>			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб..		Винокуров Т.С.			<i>Реферат</i>	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Шадрина А.В.					10	141
Консульт.								
Рук-ль ООП		Шадрина Раз-						
						<i>НИ ТПУ гр. 2БМ01</i>		

Определения, обозначения и сокращения

В данной выпускной квалификационной работе были применены следующие термины и определения:

Компрессорная станция – комплекс сооружений газопровода (магистрального), предназначенный для компримирования газа.

Газоперекачивающий агрегат – технологическое устройство, включающее привод и нагнетатель, предназначенный для повышения давления в магистральном газопроводе.

Центробежный нагнетатель – механический агрегат, осуществляющий сжатие газа без его охлаждения.

Газотурбинная установка – разновидность привода газоперекачивающего агрегата, конструктивно-объединенный совокупностью турбин, осевого компрессора, камер сгорания, систем управления и вспомогательных агрегатов, газовоздушного тракта, системы управления и вспомогательных систем.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

В настоящей выпускной квалификационной работе были использованы следующие обозначения и сокращения:

КС – компрессорная станция;

КЦ – компрессорный цех;

ГПА – газоперекачивающий агрегат;

ЦБН – центробежный нагнетатель;

					<i>Разработка мероприятий по повышению</i>		
					<i>надежности технологического обору</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб..</i>	<i>Винокуров Т.С.</i>				<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>	<i>Шадрина А.В.</i>					<i>11</i>	<i>141</i>
<i>Консульт.</i>					<i>НИ ТПУ гр. 2БМ01</i>		
<i>Рук-ль ООП</i>	<i>Шадрина А.В.</i>						
					<i>Определения, обозначения и сокращения</i>		

РК – рабочее колесо;
ГТУ – газотурбинная установка;
ТГ – топливный газ;
СГУ – сухие газодинамические уплотнения;
КИПиА – контрольно-измерительные приборы и автоматика;
АВО – аппараты воздушного охлаждения;
УОГ – узел очистки газа;
ЕСГ – Единая система газоснабжения РФ;
МГ – магистральный газопровод;
ПХГ – подземное хранилище газа;
ГРС – газораспределительная станция;
ТДУ – турбодетандерная установка;
НДС – напряженно-деформированное состояние;

					<i>Определения, обозначения и сокращения</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		12

Содержание

Введение.....	14
1. Исследования проблематики обеспечения надежности в газовой промышленности.....	16
1.1. Анализ современного состояния газотранспортной системы	16
1.2. Исследование признаков и критериев надежности	22
1.3. Классификация отказов оборудования.....	25
1.4. Зависимость характера и интенсивности отказов от периода эксплуатации	29
1.5. Анализ причин возникновения неисправностей	31
2. Оценка технологической надежности компрессорной станции	35
2.1. Технологические характеристика оборудования КС.....	35
2.2. Методология оценки технологической надежности.....	36
2.3. Оценка надежности методом структурных схем	40
2.3.1. Построение структурной схемы вероятности безотказной работы.....	40
2.3.2. Вывод функции и количественная оценка надежности системы	45
2.3.3. Структурная модель надежности ГПА	47
2.3.4. Внесение изменений в схему КС для повышения показателя надежности	55
2.4. Метод статистического анализа надежности КС.....	57
2.4.1. Обработка исходных данных.....	57
2.4.2. Построение статистической модели надежности	59
2.4.3. Выдвижение гипотезы о законе распределения	61
2.4.4. Построение теоретической модели надежности	62
2.4.5. Проверка достоверности теоретических моделей надежности.....	65
3. Конструкционные решения при проектирования рабочего колеса центробежного нагнетателя	73
3.1. Построение САД модели рабочего колеса ЦБН	75

					<i>Разработка мероприятий по повышению надежности технологического оборудования компрессорной станции</i>			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб..		Винокуров Т.С.			Лит.		Лист	Листов
Руковод.		Шадрина А.В.					13	141
Консульт.					Содержание НИ ТПУ гр. 2БМ01			
Рук-ль ООП		Шадрина А.В.						

3.2.	Сравнение прочностных характеристик РК из стали и композитного материала	82
3.3.	Оценка НДС фрезерованного РК.....	85
4.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	88
4.1.	Обоснование применение турбодетандерных установок.....	88
4.2.	Разработка проекта внедрения турбодетандерной установки	90
4.3.	Оценка экономической эффекта от реализации проекта	91
5.	Социальная ответственность	97
5.1.	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	97
5.1.1.	Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	97
5.1.2.	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	99
5.2.	Производственная безопасность	100
5.2.1.	Анализ вредных производственных факторов	101
5.2.2.	Анализ опасных производственных факторов	105
5.3.	Экологическая безопасность	106
5.3.1.	Воздействие на окружающую среду.....	106
5.3.2.	Расчет удельных выбросов стравливаемого газа при остановке ГПА 108	
5.4.	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	110
	Заключение	114
	Приложения	122

Введение

Нефтегазовая промышленность является одним из важнейших отраслей российской экономики. По итогам 3 квартала 2021 г. доходы от нефтегазовой промышленности составили 34,5% от общей доли федеральных доходов [55], поэтому бесперебойная поставка углеводородов внутри страны так и в экспорт является важнейшей задачей.

В настоящее время природный газ является востребованным источником энергии. Природный газ имеет ряд достоинств, объясняющих его востребованность, такие как: экологичность, доступность и удобство употребления как источника энергии.

Транспорт газа по трубопроводу на большие расстояния невозможен без работы компрессорных станций. Компрессорные станции являются неотъемлемой частью единой системы газоснабжения и служат для повышения давления газа, которое необходимо для транспортировки газа на большие расстояния по сети газопроводов. Надежность функционирования систем компрессорной станции является основой надежности функционирования системы газового транспорта.

Надежность является основным показателем любого оборудования и сооружения, используемого в нефтяной и газовой промышленности. От надежности характеризуют множество показателей: качество, эффективность, безотказность, риск и ряд других важных показателей. Обеспечению надежности в нефтегазовой промышленности уделяется особое внимание, т.к. отказы и аварии на магистральных газонефтепроводах могут привести к экологическим катастрофам, большим человеческим жертвам и экономическим ущербам.

Сердцем любой компрессорной станции является компрессорный цех, в котором и происходит процесс сжатия газа до определенного давления. В свое

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
					<i>Разработка мероприятий по повышению надежности технологического оборудования компрессорной станции</i>		
Разраб..		Винокуров Т.С.					
Руковод.		Шадрина А.В.			Лит.	Лист	Листов
Консульт.						15	141
Рук-ль ООП		Шадрина А.В.			<i>Введение</i>		
					<i>НИ ТПУ гр. 2БМ01</i>		

же время компрессорный цех состоит из нескольких газоперекачивающих агрегатов (ГПА). При проектировании и эксплуатации компрессорной станции особое внимание уделяется работе ГПА и вспомогательных систем.

ГПА представляет собой сложное оборудование основными элементами, которыми являются нагнетатель и привод нагнетателя (двигатель).

Актуальность темы. В настоящее время обеспечение надежности объектов транспорта нефти и газа является острым вопросом по многим факторам, такими как: интенсивное развитие системы энергетики, строительство объектов транспорта и хранения газа в районах со сложными климатическими условиями, увеличение протяженности трубопроводов, увеличение внутритрубногo давления и т.д. Поэтому обеспечение безаварийной эксплуатации является очень актуальной проблемой.

Объектом исследования является надежность современной компрессорной станции и технологического оборудования.

Новизна работы состоит в разработке мероприятий по повышению с применением современных технологий, в частности композитных материалов и турбодетандерных установок, обеспечивающих автономную систему энергообеспечения.

Целью данной работы является проведение оценки параметров надежности компрессорной станции и разработка мероприятий по повышению ее надежности.

Для достижения целей работы были поставлены следующие задачи:

1. Провести анализ технического состояния единой системы газоснабжения;
2. Провести оценку надежности технологического оборудования КС;
3. Разработать рекомендаций по повышению надежности КС;
4. Рассмотреть конструкционные решения при проектировании рабочего колеса центробежного нагнетателя и определить прочностные качества;
5. Определить экономическую эффективность проекта по внедрению турбодетандерной установки.

					<i>Введение</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		16

1. Исследования проблематики обеспечения надежности в газовой промышленности

1.1. Анализ современного состояния газотранспортной системы

В настоящее время в Российской Федерации создан уникальный и сложный технологический комплекс. Для того, чтобы газ смог добраться от добывающей скважины до конечного потребителя производится множество сложных технологических процессов, таких как: добыча, транспортировка, переработка, хранение и распределение природного газа. Этот самый сложный механизм объединен Единой системой газоснабжения (ЕСГ) (рис.1.1). Собственником ЕСГ является ПАО «Газпром».

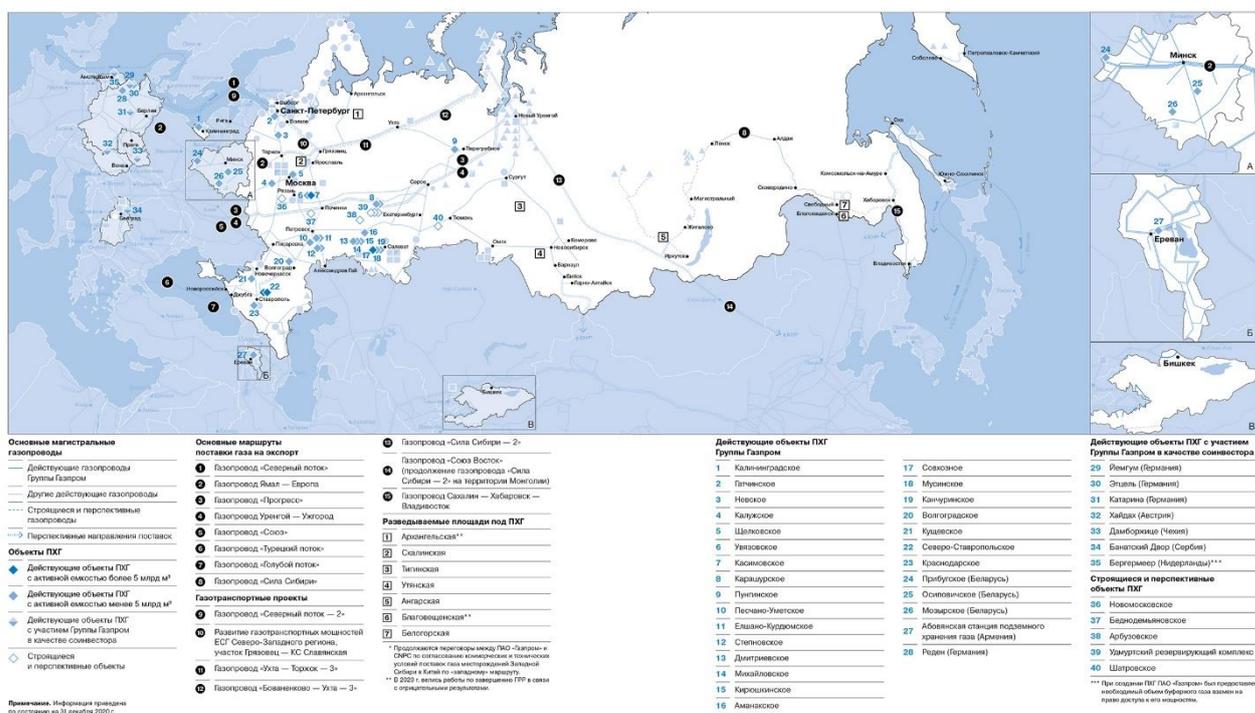


Рисунок 1.1 – Проекты и активы ПАО «Газпром»[58]

В настоящее время Российская ЕСГ входит в список одних из крупнейших систем газоснабжения в мире. Протяженность ЕСГ составляет 176,8 тыс. км[56].

				<i>Разработка мероприятий по повышению надежности технологического оборудования компрессорной станции</i>		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		
Разраб..		Винокуров Т.С.			Лит.	Лист
Руковод.		Шадрина А.В.				Листов
Консульт.						17
Рук-ль ООП		Шадрина А.В.				141
						НИ ТПУ гр. 2БМ01

В состав ЕСГ входят экспортные газопроводы и внутренняя газотранспортная система. Во внутреннюю газотранспортную систему входят следующие МГ:

- Саратов – Москва – первый газопровод в России (840 км);
- Кольцевой газопровод Московской области;
- Ставрополь – Москва;
- Краснодарский край – Санкт-Петербург;
- Медвежье – Торжок;
- Надым – Пермь;
- Нижняя Тура – Центр;
- Вуктыл – Торжок;
- Уренгой – Челябинск;
- Минск – Калининград;
- Джубга – Сочи
- Сахалин – Хабаровск – Владивосток
- Бованенково – Ухта.

Экспортные:

- «Северный поток»;
- Ямал – Европа;
- «Прогресс»;
- Уренгой – Ужгород;
- «Союз»;
- «Турецкий поток»;
- «Сила Сибири»;
- «Северный поток 2» (заморожен).

По состоянию на 31 декабря 2020 г. в состав ЕСГ входят 254 линейных компрессорных станций с 3781 газоперекачивающими агрегатами, суммарная мощность которых составляет 46,8 тыс. МВт [56].

					<i>Исследования проблематики обеспечения надежности в газовой промышленности</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		18

- Типовая структура магистрального транспорта газа (рис.1.2) состоит из:
- линейной части газопровода;
 - головной компрессорной станции, которая является началом МГ и принимает газ из месторождения, компримирует до необходимого давления и подает в магистраль;
 - промежуточных (линейных) компрессорных станций, которые обеспечивают поддержание рабочего давления;
 - подземного хранилища газа, предназначенный для компенсации сезонных неравноностей потребления газа. Закачка газа в землю обеспечивается с помощью дожимной компрессорной станции;
 - газораспределительной станции, которая является конечным пунктом в системе магистрального транспорта газа. На ГРС станции происходит редуцирование и поддерживание давление газа согласно СП 62.13330.2011;
 - газоизмерительной станции, необходимая для учета поставляемого газа на экспорт.

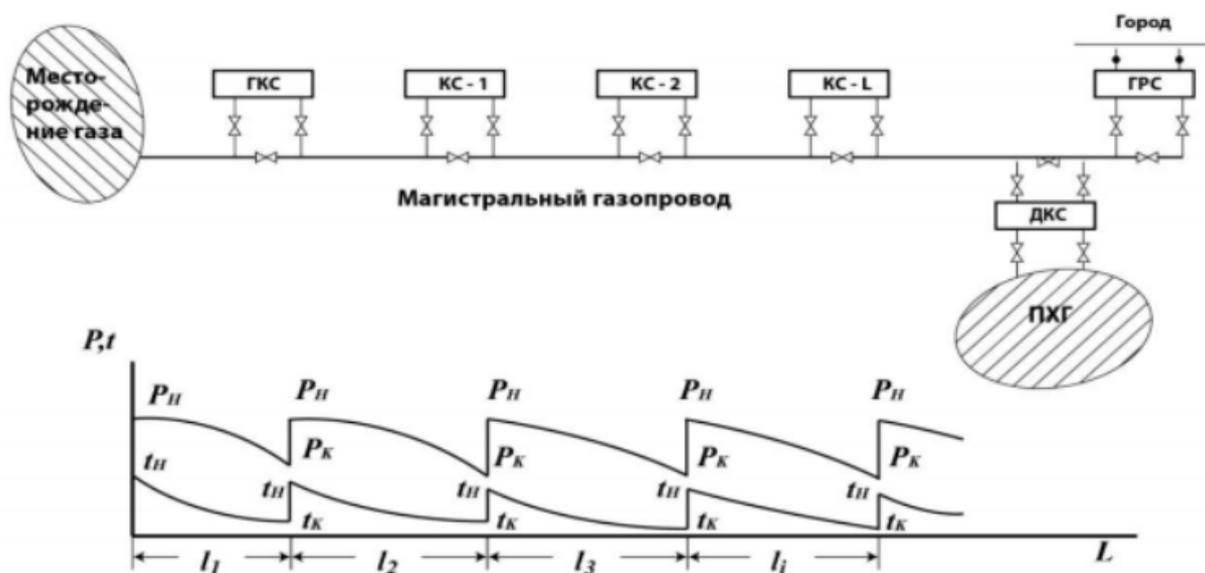


Рисунок 1.2 – Типовая структура магистрального газопровода и схема зависимости давления и температуры газа на от протяженности газопровода [37]

Необходимость использования компрессорных станций обусловлено несколькими факторами:

- потерей давления, вызванной трением потока газа об стенку трубы при движении потока газа по внутренней полости трубопровода;
- падением пластового давления на месторождении, что приводит необходимости использования головной компрессорной станции, поэтому транспортировка газа на большие расстояния невозможно лишь с помощью пластового давления.

Процесс компримирования газа на КС обеспечивается при помощи газовых компрессоров, или же нагнетателей, входящих в состав газоперекачивающих агрегатов (ГПА). В зависимости от необходимой степени сжатия и возможностей нагнетателей повышение давления может быть производится в одну, две или, в редких случаях, три степени. Нагнетатели подразделяются на компрессоры объемного и динамического действия. К «объемным» можно отнести поршневые, винтовые компрессоры. В объемных компрессорах процесс сжатия осуществляется путем сжатия рабочей среды. Давление меняется за счет периодического изменения объема камер при работе компрессора, при уменьшении объема давление повышается. Компрессоры динамического действия обычно представляют собой центробежные и осевые компрессоры. В данных видах компрессоры повышение давление осуществляется путем динамического воздействия на поток перекачиваемой среды.

Любому нагнетателю необходимо источник энергии для выполнения своих функций. На КС станциях используются двигатели в основном двух типов: электрические и газотурбинные.

Компрессорные станции размещают по трассе с учетом технологических и экономических соображений. В частности, необходимо стремиться к тому, чтобы размещение КС отвечало требованиям удобства при строительстве и эксплуатации объекта.

					<i>Исследования проблематики обеспечения надежности в газовой промышленности</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		20

Определение оптимального режима работы МГ, в частности работы КС, выполняется с сопоставлением различных вариаций и значений от отношения необходимого значения энергопотребления на компримирования и транспортировку на пропускную способность. В значительной степени этот режим определяется работой КС

При проектировании и выборе трассы трубопровода обращают внимание несколько основных параметров, таких как: диаметр и толщина стенок трубы, протяженность газопровода, пропускная способность, потери давления на участках между КС, давление на входе и на выходе, расстояние между ними и т.д.). Это сложная и комплексная работа в ходе которого учитываются множество факторов начиная от состава перекачиваемого газа и необходимых объёмов поставки газа до безопасности для населения и окружающей среде [28,34]

Неравномерность подачи газа один из характерных признаков работы современного газопровода. Неравномерность подачи газа может быть отображено по годовым, месячным и даже суточным данным. Для компенсации неравномерности на МГ предусмотрены ПХГ, но несмотря использования подходных хранилищ неравномерность подачи газа остается. В основном ПХГ предназначены для компенсации сезонной неравномерности потребления газа, вызванной низкой температурой в холодное время года. Кроме того применения ПХГ возможно не во всех случаях, это обусловлено тем, что зачастую нет возможности строительства ПХГ на некоторых участках. Поэтому современные КС приспособлены к переменному режиму работы МГ. Но, к сожалению, описанные мероприятия не являются универсальными решениями проблемы неравномерной подачи газа, т.к. все равно существуют определенные границы работы КС и негативные последствия при изменении режима работы, например, снижение нагрузки ГПА от чего следует перерасход топливного газа или электроэнергии из-за отклонения от оптимального режима и смещения рабочей точки от максимума КПД.

					<i>Исследования проблематики обеспечения надежности в газовой промышленности</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		21

Для увеличения пропускной способности газопровода можно прибегнуть к увеличению внутреннего диаметра трубы и рабочего давления. Первое можно использовать на этапе проектирования объекта, после строительства и во время эксплуатации увеличения диаметра всего трубопровода крайне затратное и фактически невозможная операция, обычно в данном случае производят лупинги или вставку трубы с большим диаметром на участках. Второй вариант более приемлем уже на этапе эксплуатации. Однако, важно учитывать характеристики трубопровода и оборудования, будет ли обеспечиваться запас прочности и надежность работы при увеличении давления.

При увеличении давления по закону термодинамики увеличивается и температура перекачиваемого газа. Перекачка газа с высокой температурой может привести негативным последствиям. Для повышения эффективности работы МГ на КС применяются аппараты воздушного охлаждения (АВО), что приводит к снижению необходимой мощности на перекачку 1 м³. Снижение температуры газа обусловлено не только тем, что это приводит к повышению энергоэффективности, но и для защиты изоляционного слоя трубы от высоких температур, и для предотвращения оттаивания и выпучивания многолетнемерзлых грунтов, что может привести к смещению оси трубопровода и к высоким напряжениям на стенку трубы.

Для повышения энергоэффективности работы МГ и уменьшения затрат мощности КС на перекачку газа, в частности, применимы следующие мероприятия:

- поддержка максимального давления газа в трубопроводе;
- снижение температуры перекачиваемого газа при охлаждении;
- использование МГ большего диаметра с гладким внутренней поверхностью, т.е. трубы с меньшей шероховатостью;
- проведение периодической очисткой внутренних полостей.

В настоящее время компрессорный парк ПАО «Газпром» имеет внушительные размеры: 307 компрессорных станций с суммарной мощностью около

					<i>Исследования проблематики обеспечения надежности в газовой промышленности</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		22

54 ГВт. Состав парка состоит из станций различного назначения: дожимной, линейной и головной. Доля газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным двигателем составляет 90%. Связи с естественным падением пластового давления эксплуатируемых месторождений повышается количество дожимных компрессорных станций и соответственно их процентная доля в суммарной установленной мощности, до 11%.

Современный парк ГПА характеризуется большим разнообразием типоразмеров и сроков выпуска установок: около 70 различных типов приводов и более 100 модификаций нагнетателей. Анализ показателей различных исследований [37,45,46,48,49,50] показывает, что значительная часть эксплуатируемого оборудования ПАО «Газпром» в настоящее время в состоянии значительного износа, в частности и оборудование КС станций, а именно ГПА, что говорит о снижении технического состояния и производительности.

В настоящее время износ основных фондов газотранспортной системы ПАО «Газпром» находится в районе 65%. По причине увеличения количества физически изношенных и морально устаревших ГПА происходит уменьшение показателей надежности, что является большой проблемой.

1.2. Исследование признаков и критериев надежности

Надежность, согласно ГОСТу Р 27.102-2021, это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, стратегиях технического обслуживания, хранения и транспортирования[27]. Надежность один важнейших свойств любого оборудования и сооружения во всех отраслях промышленности, в том числе и нефтегазовой отрасли. От надежности зависит срок эксплуатации оборудования, периодичность обслуживания, надежность оборудования и сооружений обеспечивается на всех трех этапах:

– Начальным этапом является этап проектирования. На этапе

					<i>Исследования проблематики обеспечения надежности в газовой промышленности</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		23

проектирования устанавливаются первоначальные значения надежности путем учета и расчета существующих технологических особенностей и конструктивных схем отдельных элементов и систем в целом. При необходимости проектировщики, обосновываясь задачей повышения надежности, создают резервирование рабочих линий и технологического оборудования или используют специальные устройства и систем;

– Во время строительства объекта решаются задачи, связанные с разработкой способов технологического контроля строительного-монтажных процессов и методов проведения предпусковых испытаний линейной части и технологического оборудования повышенным давлением для выявления производственных дефектов;

– В процессе эксплуатации объекта для обеспечения надежности решаются задачи, связанные с разработкой методов и способов определения технического состояния газонефтепроводов и поддержания свойств надежности, сформулированных на этапе проектирования.

Обеспечение и оценка надежности промышленных объектов необходимо проводить с помощью системного анализа. Системный анализ – это методология исследования любых объектов посредством представления их в качестве отдельных элементов и анализа этих элементов. Системный анализ может применяться для различных целей. Основной методикой изучающей закономерности отказов и их причин называется теорией надежности.

Согласно ГОСТу [27] эксплуатируемый объект может находиться в различных состояниях:

– исправное состояние (исправность): Состояние объекта, в котором все параметры объекта соответствуют всем требованиям, установленным в документации на этот объект.

– неисправное состояние (неисправность): Состояние объекта, в котором хотя бы один параметр объекта не соответствует хотя бы одному из требований, установленных в документации на этот объект;

					<i>Исследования проблематики обеспечения надежности в газовой промышленности</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		24

– работоспособное состояние: Состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативной и технической документации;

– неработоспособное состояние: Состояние объекта, в котором значение хотя бы одного из параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции, не соответствует требованиям документации на этот объект;

– состояние готовности (объекта): Состояние неработающего работоспособного объекта, в котором объект может выполнять требуемые функции в заданных условиях применения при условии, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены;

– рабочее состояние: Состояние объекта, в котором он выполняет хотя бы одну требуемую функцию;

– нерабочее состояние: Состояние объекта, в котором он не выполняет ни одной из требуемых функций и т.д.

Для оценки надежности объекта применяют определенные критерии или же количественные показатели. Все показатели надежности можно условно поделить на две части, на единичные показатели и комплексные показатели. Отличием единичных и комплексных показателей заключается в том, что первый может характеризовать одно из свойств, а второй несколько.

Единичными показателями надежности считаются следующие критерии:

– Безотказность – свойство объекта сохранять работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов;

– Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние при установленной системе технического обслуживания и ремонта;

– Ремонтопригодность – приспособленность объекта к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния;

– Сохраняемость – свойство объекта сохранять в заданных пределах

					<i>Исследования проблематики обеспечения надежности в газовой промышленности</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		25

значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования.

В свою очередь комплексными показателями надежности являются следующие критерии:

- коэффициент готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается;
- коэффициент оперативной готовности;
- коэффициент технического использования – отношение математического ожидания интервалов времени, пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий интервалов времени пребывания объекта в работоспособном состоянии, простоев, обусловленных техническим обслуживанием (ТО), и ремонтов за тот же период эксплуатации;
- коэффициент планируемого применения – доля периода эксплуатации, в течение которой объект не должен находиться в плановом ТО или ремонте;
- коэффициент сохранения эффективности.

1.3. Классификация отказов оборудования

Сбор сведений об отказах является основным источником данных для оценки надежности на промышленных предприятиях. Отказом является состояние технологического оборудования и/или системы, при котором невозможно поддержание значений в рабочем диапазоне и выполнение предназначенных функций.

Все отказы можно классифицировать по различным признакам: по времени наступления, по взаимосвязи с другими отказами, а также по причине возникновения отказа. (рис. 1.3) [9].

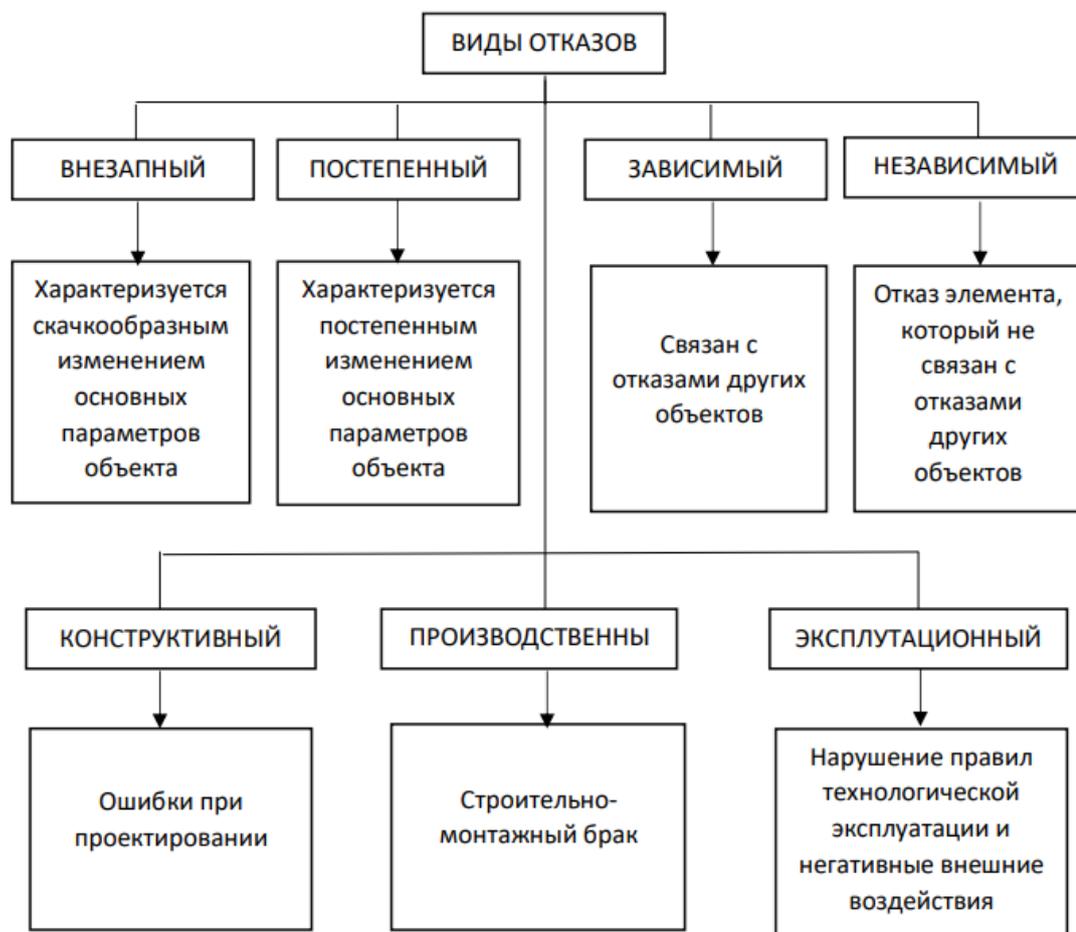


Рисунок 1.3 – Виды отказов и их определения [15]

Классификация отказов технических объектов по их физической природе представляет собой классификацию физико-химических процессов, влияющих на работоспособность элементов и возникновение отказов, а также по классификацию условий протекания процессов. Такая классификация может быть проведена по типу (классу) материала элемента, по месту протекания процессов, влияющих на работоспособность объекта, по виду энергии, определяющей характер процесса, по типу эксплуатационного воздействия, по характеру (внутреннему механизму) процесса. Например:

- отказы, связанные с разрушением и возникновением различных дефектов детали;
- отказы, не связанные с разрушениями, в том числе, недостаточная вязкость масла, облитерация каналов подачи топлива и смазки, нарушение регулировки узлов, ослабление резьбовых соединений, дисбаланс.

Отказы могут наносить различный ущерб оборудованию или системе, в зависимости от тяжести возникшего отказа определяется возможность дальнейшей эксплуатации изделий. По возможности использования объекта после возникновения отказа можно классифицировать отказы на:

- полные, которые исключают возможность работы изделия до их ликвидации;
- частичные, при наличии которых изделие можно использовать на пониженной скорости или с неполной мощностью.

Другими словами, при полных отказах работы по устранению выполняются при полной неспособности системы, а при частичном возможно провести восстановительные работы во время работы системы. На примере газопровода можно такие отказы как: микросвищ, закупоривания полости трубы гидратом, которые относятся к частичным, а разрыв трубопровода будет классифицироваться уже как полный отказ.

По характеру происхождения отказы определяются как: быстроразвивающиеся (аварийные) и постепенные (износ, старение, загрязнения и т.д.).

Отказы, в зависимости от вызвавших их причин, можно подразделить на группы: производственные и эксплуатационные (рис.1.4).

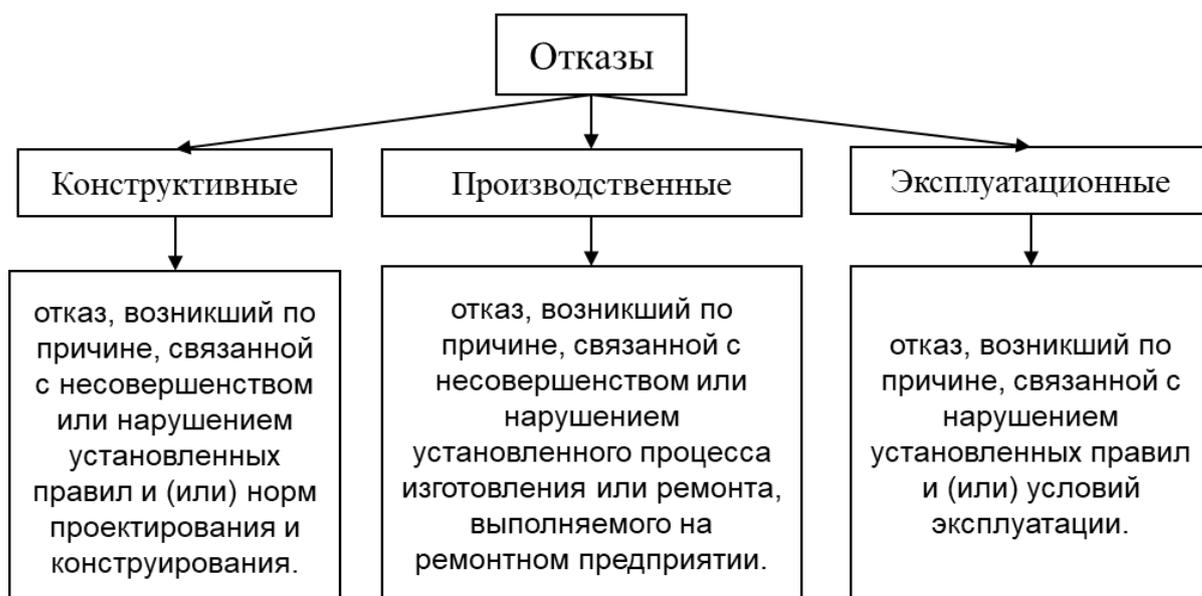


Рисунок 1.4 – Классификация отказов в зависимости от причин

При всем своем многообразии, в зависимости от вызвавших их причин, отказы можно подразделить на три группы [7,15]:

– к первой группе относятся конструкционные отказы. Причиной возникновения данных отказов являются дефекты конструкции, возможные производственные браки и неточности в эксплуатационно-технической документации. Данная группа отказов по физике своей аналогична для всех идентичных экземплярах одной системы, поэтому после обнаружения и исправления отказов первой группы, могут быть проведены доработки на остальных экземплярах или же выполнении мероприятий, исключающих повторного отказа;

– вторая группа отказов заключается в разности сроков службы комплектующих элементов системы и/или в разбросе рабочих диапазонов различных параметров, а также режимов работы и условиями эксплуатации. В отличии от первой группы во второй группе отказ на отдельном экземпляре не является доказательством о непригодности других экземпляров в этой же системе. Отказы данной группы зачастую являются не повторяющимися;

– третья группа отказов характеризуется износом. Износ – это изнашивание оборудование в процессе его использования, износ происходит под воздействием постоянного физического воздействия таких как: трение, вибрация, различных нагрузок, эрозии и т.д.

В большинстве случаев возникновения отказов вызвано развитием дефектов и повреждений. При наличии дефекта, не приведшего к потере работоспособности элемента очень важно его обнаружить, так как любой отказ предшествуют развивающиеся дефекты и неисправности. Обнаружении дефекта заключается в постоянном мониторинге оборудования и системы. При поиске дефекта возникают различные трудности, в частности то, что в рабочем процессе каждый элемент испытывает различные внешние воздействия, которые могут привести к ложному представлению о работе элемента. Поэтому при поиске дефекта необходимо учитывать взаимодействия различных элементов и систем

друг на друга. Анализ причин возникновения отказов в период эксплуатации, а также классификация отказов по группам, являются важнейшими этапами исследования надежности технических систем и их своевременной диагностики.

1.4. Зависимость характера и интенсивности отказов от периода эксплуатации

Для классификации отказов и определения возможных причин возникновения отказов необходимо понимать в какой период функционирования произошел отказ. Существуют три периода функционирования оборудования, каждый период имеет свои особенности, которые могут характеризовать и объяснить причину возникновения отказа (рис.1.5).



Рисунок 1.5 – Периоды функционирования оборудования

Опыт эксплуатации показывает, что изменение интенсивности отказов функционально связанных элементов по времени для большинства узлов и агрегатов носит характер кривой [9] изображенной на рис.1.6. Первый период (I) – это период приработка и отказов некачественных изделий, второй период (II) это время нормальной эксплуатации оборудования, в данный период

интенсивность отказов приблизительно постоянна, третий период (III) считается периодом старения – причина отказов в основном вызваны износом деталей и старением материалов, с увеличением продолжительности работы интенсивность отказов увеличивается по экспоненте.

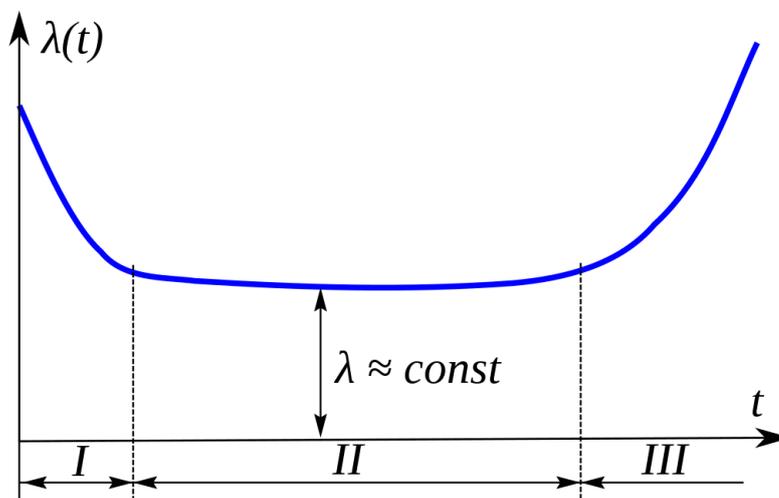


Рисунок 1.6 – Зависимость интенсивности отказов от времени[54]

Интенсивность отказов – это отношение числа отказавших объектов в определенный период работы к среднему числу исправных объектов. Интенсивность отказов определяется следующей формулой:

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{\Delta t \cdot N_{cp}} = \frac{n(t)}{\Delta t \cdot [N - n(t)]} \quad (1.3)$$

где, N – общее число рассматриваемых изделий, шт.;

N_{cp} – среднее число исправно работающих образцов в интервале времени, шт.;

$n(t)$ – число отказавших образцов в интервале времени, шт.;

Δt – интервал времени, сутки.

Каждый период функционирования имеет свои особенности. Например, в третьем периоде замена изношенных деталей на новые не целесообразно по причине того, что снижает общий уровень надежности изделия. В первом периоде обнаружения и устранения дефектов выполняется во время приемосдаточных испытаний. После приработки объекта назначается ресурс, который рассчитан до конца третьего периода.

Как уже понятно из вышеперечисленного, необходимо соотношение видов отказов с периодами функционирования элемента. Вследствие этого возникает необходимость оценить количественную сторону появления той или иной группы отказов в установленный период функционирования системы.

Как говорилось раньше отказы в зависимости от причин можно разделить на три группы, каждая группа характерная для определённого периода функционирования объекта. В начале первого периода в основном наблюдаются лишь конструктивные отказы (первая группа). После возникновения каждого отказа выполняются профилактические работы во избежания повторных отказов. На рис. 1.6 можно заметить, как происходит уменьшение интенсивности отказов, что как раз таки характерно для отказов первой группы.

Второй период называется период постоянной эксплуатации. В данном периоде характерны отказы второй и третьей групп, тем самым и объясняется более-менее нахождение интенсивности отказов на одном уровне.

В период старения преобладает уже комбинация первой и третьей группы. По истечению срока эксплуатации оборудования учащаются отказы по причине износа. В этот период происходит износ всего оборудования и системы в целом, ресурс подходит к своему концу. Причина отказа во всех случаях схожи, однако снизить интенсивность отказов не представляется возможным в отличии от первого случая [1,7].

Определение зависимости работоспособности всей системы от частоты отказов элемента можно определить с помощью статистического анализа надежности оборудования. Статистический анализ отказов до сих пор является одним их основных инструментов для оценки надежности.

1.5. Анализ причин возникновения неисправностей

Главным фактором надежности в нефтегазотранспортной системе является срок эксплуатации технического оборудования. При анализе технического состояния газотранспортной системы было выявлено то, что большинство основных фондов приходит к концу срока эксплуатации. По причине массового

износа газопроводов и технологического оборудования возникает необходимость постоянного поддержания показателей надежности на необходимом уровне.

Высокие показатели износа оборудования КС определяется тем, что в восьмидесятых годах прошлого века шел беспрецедентный прирост мощностей парка ГПА, установленные мощности увеличивались многократно в течение каждых 5 лет, а уже в девяностых годах активное производство и накопление мощностей ГПА прекратилось. В результате чего в настоящее время осталось множество агрегатов данной эпохи, у которых подошёл к концу жизненные циклы. Кроме того, такие темпы строительства и ввода мощностей имели негативное влияние на качества строительства КС и в игнорировании освоении нового оборудования.

Для предотвращения резкого увеличения интенсивности отказов на ГТС применяют следующие мероприятия:

- Создание и использование межсистемных переемычек;
- Использование резервных мощностей;
- Разгрузка изношенных участков и его элементов.

Вышеперечисленные мероприятия можно соотнести способам компенсации недопоставок газа при возникновении крупных аварийных ситуаций.

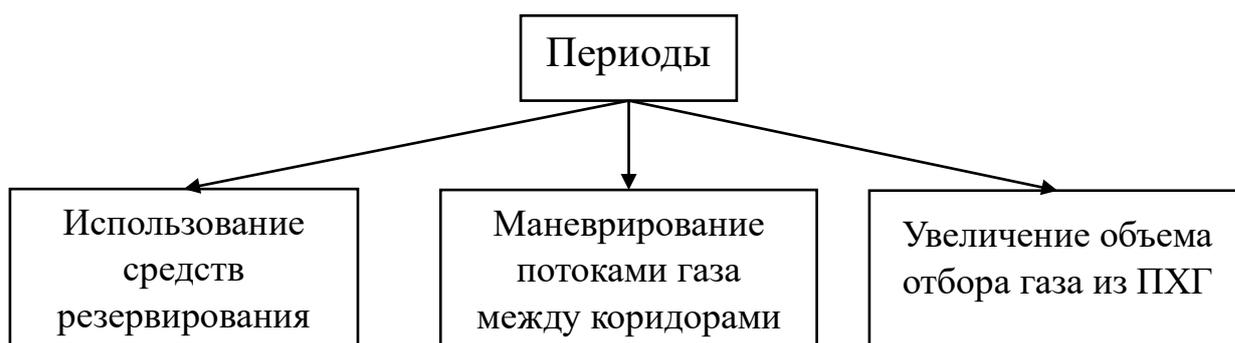


Рисунок 1.7 – Способы компенсаций недопоставок газа из-за крупных аварий

Несмотря на существующие методы не перестают активные поиски более совершенных мер по предотвращению лавинообразного снижения надежности.

Высокие показатели износа оборудования КС определяется тем, что в

восьмидесятых годах прошлого века шел беспрецедентный прирост мощностей парка ГПА, установленные мощности увеличивались многократно в течение каждых 5 лет, а уже в девяностых годах активное производство и накопление мощностей ГПА прекратилось. В результате чего в настоящее время осталось множество агрегатов данной эпохи, у которых подошёл к концу жизненные циклы. Кроме того, такие темпы строительства и ввода мощностей имели негативное влияние на качества строительства КС и в игнорировании освоении нового оборудования.

По различным исследованиям [2,38,39,44] было выяснено, что соотношение причин отказов на КС имеет следующий вид:

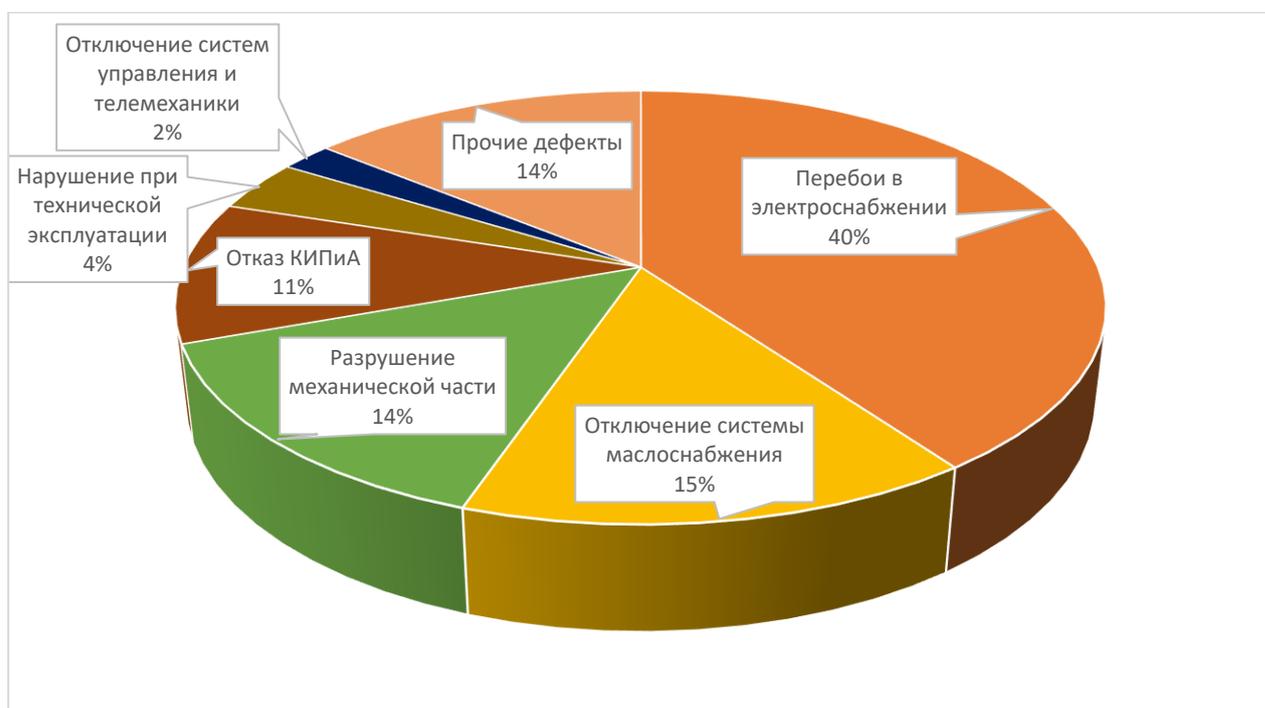


Рисунок 1.8 – Распределение отказов на компрессорных станциях

Основными блоками входящими в состав ГПА являются:

- осевой компрессор;
- турбина;
- камера сгорания;
- система смазки;
- подшипники;
- рабочее колесо нагнетателя;

- система уплотнения.

Данные рабочие элементы подлежат особому контролю и диагностике их технического состояния для своевременного выявления и устранения возможных неисправностей для предотвращения отказов и следовательно поддержания надежности.

В ходе анализа выявлено, что за последние 10 лет основными факторами и причинами способствовавших возникновению и развитию неисправностей являлись:

- повышенная вибрация и просадка газопроводов обвязки ГПА и коллекторов;
- производственные дефекты оборудования;
- погрешности и ошибки при монтаже;
- коррозия и износ.

В данной главе было выявлены существующие проблемы Единой газотранспортной системы России, а именно высокий износ основных фондов объектов транспорта газа, что приводит к снижению показателей надежности, кроме того, существует проблема отсутствия единой системы информационно-аналитического управления и мониторинга. Определены понятие и критерии надежности объектов и систем в нефтегазотранспортной системе и методология оценки технологической надежности, вместе с которой в дальнейшем будет проведена работа.

					<i>Исследования проблематики обеспечения надежности в газовой промышленности</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		35

2. Оценка технологической надежности компрессорной станции

Исследуемая компрессорная станция является объектом ООО «Газпром трансгаз Томск».

Компрессорная станция подключена к МГ с диаметром трубы – [REDACTED] и проектным рабочим давлением – [REDACTED]. Суммарная мощность станции является самой высокой среди всех компрессорных станций, находящихся на территории Сибири и Дальнего Востока, и составляет [REDACTED]. Проектная производительность составляет [REDACTED].

Режим работы КС – непрерывный в течение года с периодическими остановками (в летнее время) на срок не менее 48 часов для проведения профилактических и необходимых ремонтных работ, а также для подготовки оборудования и осенне-зимнему периоду эксплуатации.

2.1. Технологические характеристика оборудования КС

В состав КС входят основные системы:

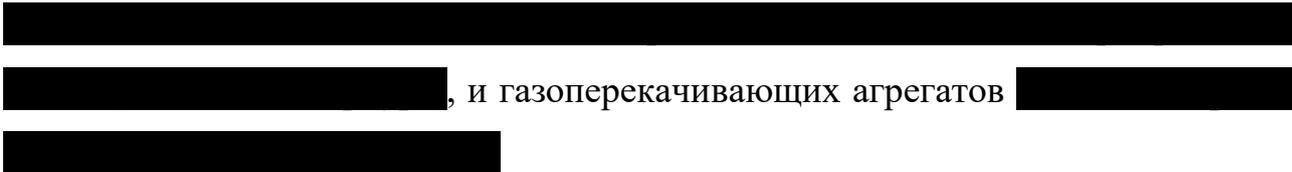
- узел подключения КС;
- узел очистки газа, состоящий из блоков фильтров-сепараторов (БФС) в количестве 6 штук;
- агрегаты газоперекачивающие [REDACTED] в блочно-контейнерном укрытии [REDACTED];
- агрегаты газоперекачивающие [REDACTED] в индивидуальном укрытии ангарного типа [REDACTED];
- установки охлаждения газа (УОГ).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
					<i>Разработка мероприятий по повышению надежности технологического оборудования компрессорной станции</i>		
Разраб..		Винокуров Т.С.			Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Шадрина А.В.				36	141
Консульт.					<i>НИ ТПУ гр. 2БМ01</i>		
Рук-ль ООП		Шадрина А.В.					



Рисунок 2.1 – Технологическая схема компрессорной станции

Компрессорная станция состоит из газоперекачивающих агрегатов



2.2.Методология оценки технологической надежности

Для оценки надежности технических систем применяются различные аналитические и математические методы. Как ранее говорилось – основной методикой изучающей закономерности отказов и их причин называется теорией надежности. Математические методы теории надежности основываются на использовании элементов:

- теории вероятностей;

- математической статистики;
- теории массового обслуживания,
- теории случайных процессов,
- теории графов,
- методов оптимизации. [8]

На этапе эксплуатации объектов в нефтегазовой отрасли необходимо провести исследования, построить модели систем и оценить надежность.

Оценка надежности может быть качественным и количественным. Однако только количественный анализ позволяет получить численные значения показателей надежности и возможность сравнения и выбора наиболее успешного в плане надежности системы.

Для получения количественной оценки надежности действующей системы необходимо построить модель надежности каждого ее элемента на базе математического или компьютерного моделирования, основанного на вероятностных и статистических методах.

Главной задачей при построении модели надежности газонефтегазотранспортной системы является установление функциональной зависимости F между факторами x_i , воздействующими на систему, и откликами y_i , которые являются реакцией системы на воздействие.

Факторами (x_i) называются независимые переменные, а откликами (y_i) – зависимые. Полученная функциональная зависимость позволяет провести расчеты количественных характеристик надежности нефтегазопроводных систем или их параметров, что в итоге дает возможность разработать управляющие воздействия, направленные на повышение надежности исследуемой системы (рис.2.2).

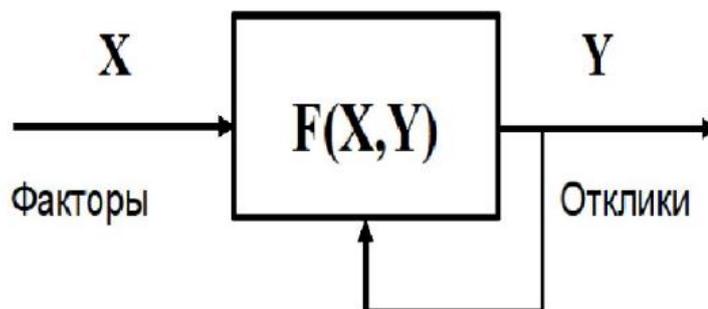


Рисунок 2.2 – Функциональная зависимость $F(X, Y)$ между факторами x_i , воздействующими на систему, и откликами y_i на воздействие

Однако учесть все факторы в рамках одной модели невозможно, поэтому следует выбрать наиболее значимые, иначе можно впасть в другую крайность – упростить модель до такой степени, что она будет неадекватна действительности.

Факторы $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и отклики $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ являются наблюдаемыми величинами. Это значит, что необходимо располагать методикой сбора и обработки статистических данных о наработках системы до отказа и причинах возникновения аварий.

Кроме того, сам метод построения моделей надежности газотранспортных систем может быть различным. Это обуславливает проведение анализа для выбора определенного метода компьютерного моделирования при построении моделей надежности разной степени сложности для конкретных условий эксплуатации газонефтегазотранспортной системы.

Для оценки надежности представленной КС можно использовать два метода: построение структурной модели надежности и построение статистической модели надежности.

Структурную модель надежности можно представить как логическую схему, состоящая из взаимодействующих элементов системы, которые определяют состояние системы, согласно ГОСТу 27.102-2021, на работоспособное и неработоспособное. Метод структурных схем используется для анализа безотказности относительно простых систем, кроме того, при применении данного

метода не рассматривается и не учитывается физическая природа отказов. При расчете надежности методом структурных схем оперируются такими характеристиками как интенсивность потока отказов, параметр потока отказов, наработка на отказ, вероятность безотказной работы, отвечающих за такой показатель надежности как безотказность.

Методология оценки надежности методом построения структурной схемы состоит из шести этапов:

1. Изучение структуры системы и её основных функций. Определение роли элементов в системе. Установление функциональных связей между отдельными элементами системы. Применение допущений и ограничений.
2. Структурный анализ надёжности схемы и построение структурной схемы безотказной работы.
3. Вывод функции надёжности схемы.
4. Количественная оценка величины вероятности безотказной работы системы.
5. Выявление наиболее уязвимой к отказу связки элементов.
6. Разработка рекомендаций улучшения схемы для повышения вероятности безотказной работы системы.

Второй метод – статистическое моделирование позволяет описать случайные величины, случайные события и случайные процессы, характеризующие надежность сложного объекта или системы.

Показатели надежности определяются в процессе статистической обработки результатов моделирования

Статистическая модель надежности может быть построена для любых вероятностных законов возникновения отказов элементов, что позволяет определить параметры надёжности при сложных аналитических зависимостях или даже отсутствии таковых, например, при наличии только экспериментальных числовых данных.

					<i>Оценка технологической надежности компрессорной станции</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		40

Статистическое моделирование базируется на использовании значений случайных величин с заданной (аналитически или таблично) плотностью вероятности $f(t)$ с последующим построением и компьютерной реализацией алгоритма, имитирующего работу системы. В результате испытаний модели получается серия значений определяемых показателей надёжности, которые обрабатываются методами математической статистики. Если количество испытаний N достаточно велико, то полученная серия значений приобретает статистическую устойчивость и сходится к достоверной оценке значения искомого параметра надёжности.

Методология статистического анализа надёжности так же состоит из нескольких этапов

1. Обработка статистических данных по отказам.
2. Выдвижение гипотезе о законе распределения времени безотказной работы исследуемого объекта.
3. Построение теоретической модели надёжности методом компьютерного моделирования.
4. Проверка достоверности построенной модели.

Далее будет проведен анализ технологической надёжности компрессорной станции, являющейся объектом ООО «Газпром трансгаз Томск», дочерней компанией ПАО «Газпром».

2.3. Оценка надёжности методом структурных схем

2.3.1. Построение структурной схемы вероятности безотказной работы

Как говорилось в первой главе для исследования надёжности объекта газонефтяной транспортной системы необходимо в начале анализ факторов, влияющих на надёжность системы. Анализ представляет собой описание условий функционирования системы. Так как провести четкое разделение между сложными и простыми система достаточно затруднительно, выделяются основные факторы и элементы влияющие на надёжность системы.

					<i>Оценка технологической надёжности компрессорной станции</i>	<i>Лист</i>
						41
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Сутью метода исследования показателя надежности является построение структурной схемы надежности системы путем выделения основных факторов и применения определенных допущений.

Компрессорная станция – это сложная система, состоящая из множества элементов. Каждый элемент данной системы играет свою роль, которая необходимо для налаженной работы всего технологического процесса. Для повышения надежности системы зачастую каждое оборудование дублируется, т.е. имеет резервный запас в случаи выхода из строя или во время технического обслуживания основного оборудования или же линии для поддержания работоспособности всей системы.

Для построения структурной схемы функциональной работоспособности компрессорной станции необходимо применить определенные допущения:

- Каждый узел КС будет рассматриваться как отдельный элемент системы, при необходимости каждый элемент будет представлять собой отдельную систему;
- Вспомогательные системы, оборудования, датчика и средства КИПиА не будут учитываться для упрощения конечной модели.

Некоторые системы будут состоять из элементов, которые являются отдельными системами имеющие собственную структурную схему того или иного узла КС.

На рис. 2.3 представлена общая структурная схема ко компрессорной станции, где X1 – магистральный газопровод; X2 – входной трубопровод; X3 – УОГ; X4 – компрессорный цех (КЦ); X5 – аппараты воздушного охлаждения (АВО); X6 – выходной трубопровод X7 – обводная линия.

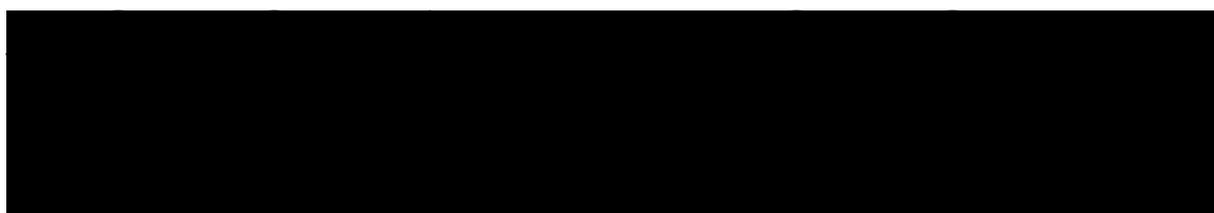


Рисунок 2.3 – Общая структурная схема компрессорной станции

					Оценка технологической надежности компрессорной станции	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

Структурная схема надежности для УОГ, в котором установлено параллельно шесть БФС: четыре рабочих и два резервных приводится на рис.2.4.

Рабочие БФС обозначаются номерами [REDACTED], а резервные агрегаты - номерами [REDACTED]. Из критерия надежности следует, что постоянно должны работать четыре агрегата. При нормальных условиях должны работать с первого по четвертый блок фильтров, что соответствует первой ветви модели-схемы надежности УОГ.

Если откажет первый блок-фильтров, то рабочим станет резервный пятый блок-фильтров, что соответствует второй ветви или резервный шестой блок-фильтров, что соответствует третьей ветви модели-схемы надежности УОГ. Если откажет второй блок фильтров, то рабочим станет резервный пятый блок фильтров, что соответствует четвертой ветви или резервный шестой агрегат, что соответствует пятой ветви модели-схемы надежности УОГ и т.д.



Рисунок 2.4 – Структурная схема узла очистки газа

					Оценка технологической надежности компрессорной станции	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

Структурная схема надежности КЦ имеет более сложную конструкцию. Условия надежной работы обеспечивает лишь тогда, когда работает ГПА и агрегатное АВО. К тому же из-за высоких требований к бесперебойной работе КС, которая является частью экспортного МГ, необходимо, чтобы один агрегат находился в рабочем резерве. В случае аварийного останова работающего на магистраль агрегата необходимо, чтобы резервный агрегат подключился на подачу газа в магистральный газопровод в тот же момент. Для обеспечения такого процесса в работе должно находиться два агрегата: один подающий газ в магистральный газопровод, второй работающий в замкнутом контуре.

Кроме того, сложность заключается тем, что на станции применяются два вида ГПА

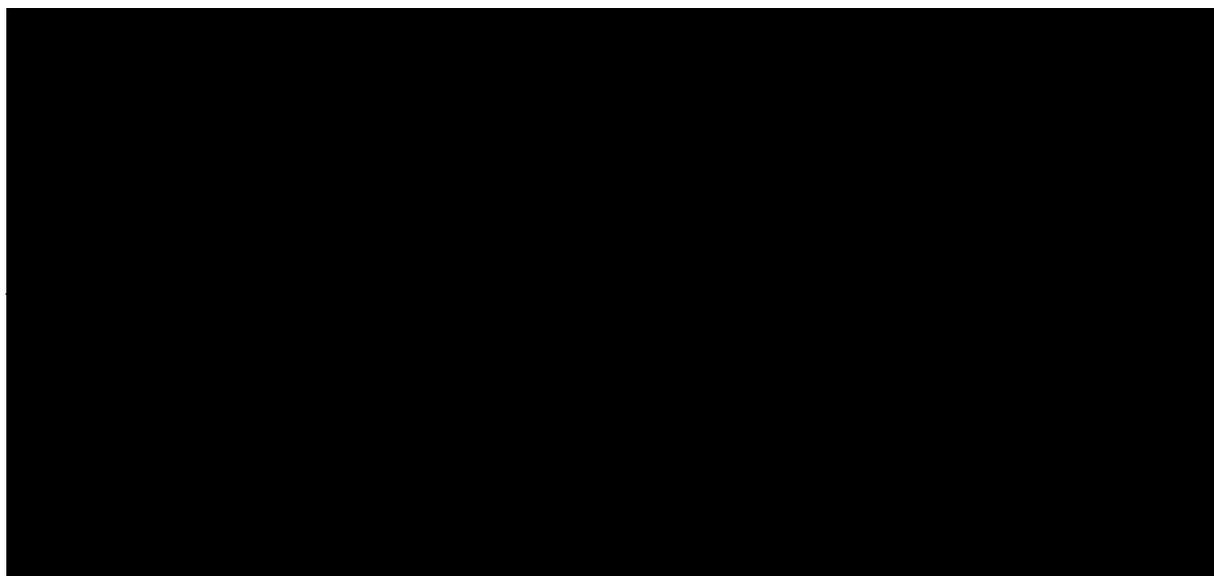
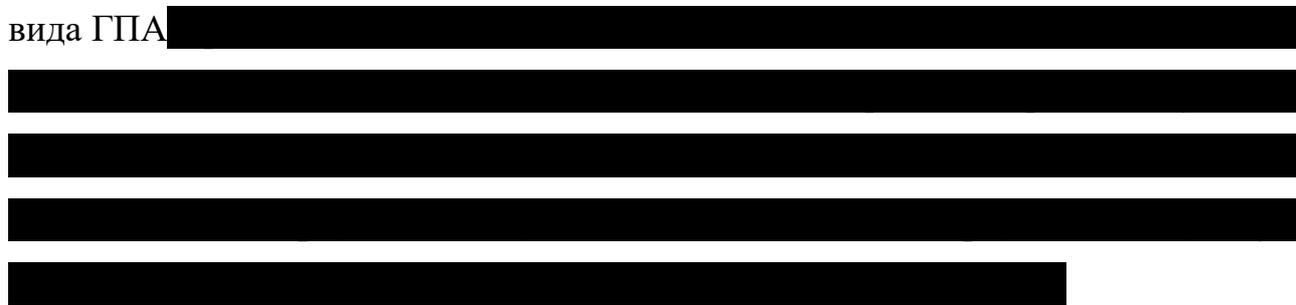


Рисунок 2.5 – Структурная схема компрессорного цеха

Для того чтобы удовлетворить условиям монотонности АВО принимается допущение: состояние «работает» учитывается лишь в том случае, когда все вентиляторы должны быть полностью работоспособны.

					Оценка технологической надежности компрессорной станции	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

В дальнейшем при оценке надежности системы будем аккумулироваться на одной показателе надежности, а именно на вероятность безотказной работы. Вероятность безотказной работы имеет несколько достоинств при использовании его в расчетах, например, вероятность безотказной работы охватывает несколько факторов влияющих на надежность элементов, к тому же данный показатель можно использовать при расчете надежности сложных систем, состоящих из множества элементов, коим и является компрессорная станция.

Вероятность безотказной работы ($P(t)$) – это безразмерная величина, характеризующая степень надежности объекта. При статистической оценке используется следующее выражение:

$$P(t) = \frac{n(t)}{N} \quad (2.1)$$

где, $n(t)$ – число изделий, не отказавшие к моменту времени t ;

N – число изделий, поставленных на испытания;

Как можно понять вероятность безотказной работы обратен вероятности отказа системы ($Q(t)$) (рис.2.6), поэтому справедливо следующее выражение:

$$Q(t) = 1 - P(t) = \frac{N - n(t)}{N} \quad (2.2)$$

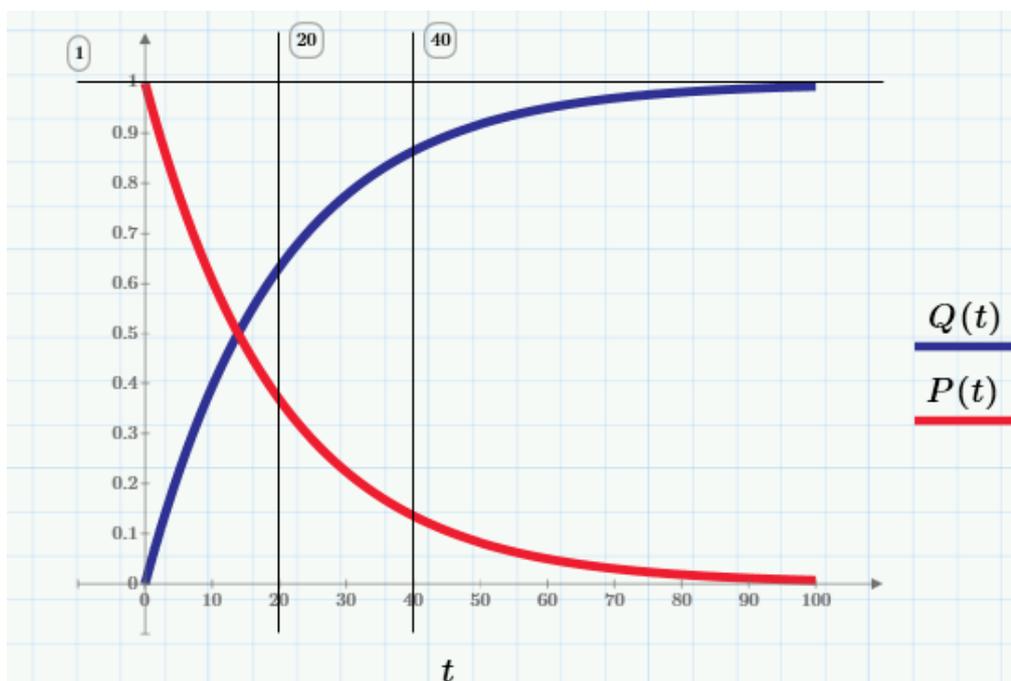


Рисунок 2.6 – Вероятность безотказной работы и отказа [54]

Как видно из графика, вероятность безотказной работы системы — это невозрастающая функция, т.е. с течением времени вероятность возникновения отказа все больше. В начале эксплуатации $t = 0$ вероятность отказа $Q(0) = 0$, в дальнейшем, когда $t \rightarrow \infty$ вероятности безотказной работы и отказа будут равны 1 и 0 соответственно. Иными словами, в определенный момент времени неизбежно произойдет отказ оборудования и чем значение t больше тем вероятнее это событие.

2.3.2. Вывод функции и количественная оценка надежности системы

Для оценки надежности системы, являющееся компрессорной станцией, применим уже построенные структурные схемы надежности. Для выявления количественных показателей воспользуемся критерием безотказности, а именно вероятностью безотказной работы системы.

Сложностью на данном этапе является определение вероятности безотказной работы каждого отдельного элемента/оборудования в системе. Однако для оценки структуры системы и компоновки оборудования можно применить некоторые допущения и использовать одинаковые значения $P(t)$ для всего оборудования, основываясь на практический опыт из расчетов из литературных источников [2]. Для всего оборудования КС примем вероятность безотказной работы $P(t) = 0,8$.

Структурная функция работоспособности для УОГ КС $S(X_3)$, в котором установлены параллельно шесть блоков фильтров-сепараторов [REDACTED]: четыре рабочих и две резервных, построенная на основании структурной схемы надежности (рис.2.4), будет определяться следующей формулой:

$$S(X_3) = 1 - (1 - P_1)^4 (1 - P_2)^2$$

[REDACTED]
[REDACTED]
Структурная функция работоспособности для цеха ГПА $S(X_4)$, которая состоит [REDACTED]

[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED] будет определяться по формуле:

[REDACTED]
И в итоге структурная функция работоспособности КС со структурной схемой (рис.2.3) будет определяться по формуле:

[REDACTED]
Для вычисления вероятности безотказной работы КС надо разделить по узлам, наиболее сложные по своей структуре узлы – это компрессорный цех и узел очистки.

Вероятность безотказной работы УОГ КС, в котором каждый блок фильтров-сепараторов будет иметь значения безотказной работы $x_i = 0,8$, определяется по формуле 2.3:

[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
Вероятность безотказной работы компрессорного цеха, состоящий из входного и выходного коллекторов, ГПА и АВО:

[Redacted text block]

Для решения вероятности безотказной работы КС по формуле 2.5 используется рассчитанные значения вероятности безотказной работы УОГ $S(X_3)$ и КЦ $S(X_4)$, то получится:

[Redacted text block]

Как видно из расчетов наиболее уязвимый к отказам элементом КС станции является компрессорный цех. Низкий показатель надежности объясняется тем, что в компрессорном цеху состоит из большого количества оборудования и необходимости одновременной работы двух агрегатов. Вероятность безотказной работы КЦ можно было бы повысить до 0,62, если вместо двух ГПА с мощностью 16 МВт использовать один с мощностью 32 МВт. Необходимостью использования менее мощных ГПА были обусловлены другими режимами работы в начале эксплуатации МГ «Сила Сибири», до такого как газопровод достиг проектных мощностей.

По проекту КС предполагается строительство второго компрессорного цеха. По результатам проведенной работы рекомендуется в новом компрессорном цехе использовать агрегаты одного типа – ГПА-32 «Ладога», для повышения надежности компрессорного цеха и всей КС в целом.

2.3.3. Структурная модель надежности ГПА

В свою очередь ГПА, который является основным оборудованием на КС, имеет большой состав оборудования и различных систем обеспечивающих работоспособность агрегатов. Для построения полной картины работоспособности КС необходимо провести оценку ГПА и вспомогательных систем обеспечивающих работоспособность основного оборудования КС.

Как можно видеть из таблицы основные составные части двух агрегатов идентичны друг к другу, кроме системы смазки в [REDACTED] существует две маслосистемы: одна предназначенная для смазки подшипников ГТУ, а вторая для подачи смазки к подшипникам ЦБН, в то время как в [REDACTED] система маслоснабжения одна для всего ГПА.

Для функционирования ГПА можно выделить несколько основных систем и устройств, среди них:

- центробежный нагнетатель;
- газотурбинный двигатель;
- система топливного газа (ТГ);
- система маслообеспечения;
- сухие газодинамические уплотнения (СГУ);
- система буферного газа;
- система барьерного и приборного газа.

Центробежный нагнетатель представляет собой корпус, внутри которого находится «пакет» из роторной части, в состав которого входит: рабочее колесо, подшипники, лабиринтные уплотнения и т.д. Рабочее колесо является лопаточным устройством обеспечивающий сжатие природного газа путем преобразования механической работы в кинетическую энергию с последующим преобразованием её во внутреннюю энергию.

Газотурбинный двигатель является установкой, генерирующая рабочую энергию, что позволяет обеспечивать работу ЦБН. ГТУ состоит из множества элементов, таких как: осевой компрессор, камера сгорания, турбина, газоздушный тракт, выхлопная система и т.д. Принцип работы данного двигателя таков, осевой компрессор сжимает воздух и подает сжатый воздух в камеру сгорания, в камере сгорания через свои каналы подается топливный газ, образовавшая газоздушная смесь сжигается для получения дополнительной энергии. Далее после перегорания топлива продукты горения с высокой

					Оценка технологической надежности компрессорной станции	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

температурой закручивают лопатки турбины, которая обеспечивает вращение осевого компрессора, а также передает энергию через редуктор. Отработавшие газы от ГТУ через систему выхлопа ГПА выбрасываются в атмосферу.

Дополнительная очистка ТГ от твердых частиц для запуска и работы ГТУ производится фильтрами системы ТГ, размещенными внутри ангара. Агрегатные фильтры ТГ являются контрольными фильтрами стационарных блоков подготовки ТГ.

Для обеспечения герметизации подшипниковых узлов, расположенных на концах вала компрессора, от транспортируемого природного газа и обеспечения заданных условий эксплуатации узлов уплотнений компрессора установлен комплект СГУ (поз. 24).

Для выброса в атмосферу отработавших газов от СТ ГТУ предназначена система выхлопа ГПА (поз. 1).

Из вышеперечисленного необходимо обозначить те элементы системы, которые необходимы для безотказной работы ГПА и на основе этих данных будет построена структурная схема работоспособности.

Система топливного газа предназначена для подачи ТГ в камеру сгорания ГТУ. Система ТГ обеспечивает очистку газа от механических примесей и капельной влаги с помощью фильтров-влагоотделителей, подогрев газа и поддержание его температуры в заданных пределах, измерение расхода газа для учета потребления на собственные нужды, автоматическое поддержание давления в заданных пределах с помощью регулятора давления.

Система маслообеспечения обеспечивает фильтрацию, охлаждение масла для смазки подшипников, кроме того, обеспечивает суфлирование подшипниковых опор.

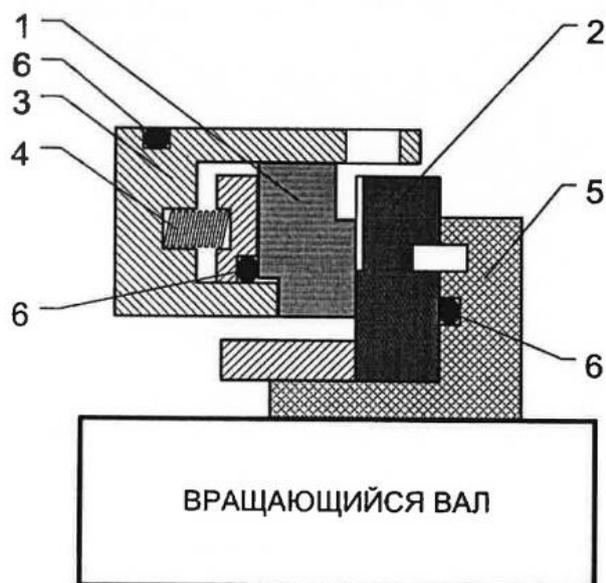
Для обеспечения герметизации и предотвращения утечек газа из полости ЦБН на рассматриваемой КС используются сухие газодинамические уплотнения (СГУ). СГУ представляет собой сборочную единицу, собранную из отдельных деталей, устанавливаются на концах вала ЦБН для герметизации

					<i>Оценка технологической надежности компрессорной станции</i>	<i>Лист</i> 51
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

перекачиваемого газа в рабочей полости ЦБН в динамическом и статическом режимах работы. Узел СГУ состоит из роторной и статорной части, а также монтажных пластин для скрепления роторной частей уплотнения во время транспортировки, хранения и монтажа компрессора.

Для обеспечения работы СГУ необходимо подача буферного и барьерного газов. При подаче буферного газа на уплотнительную ступень СГУ (рис.2.7) между седлом и торцом происходит расширение газа, который отталкивает торец от седла. Возникающая сила отталкивания торца от седла уравнивается металлическими пружинами с противоположной стороны торца. Усилия внутри СГУ рассчитаны таким образом, чтобы уравновесить графитовый торец на расстоянии от седла в 3-5 мкм на всех возможных режимах работы компрессора. Барьерное уплотнение предназначено для изоляции внутреннего пространства СГУ от подшипниковых камер компрессора. Барьерное уплотнение работает на сжатом азоте. На СГУ используется две модели барьерного уплотнения:

- лабиринтного типа;
- щелевого типа – для сжатия азота.



1 – Торец; 2 – Седло; 3 – Держатель; 4 – Пружина; 5 – Втулка; 6 – О-образное кольцо

Рисунок 2.7 – Уплотнительная ступень СГУ

Уплотнения лабиринтного типа состоит из гребней, которые разделяют зазор между роторной частью на ряд последовательно расположенных камер, в которых происходит непрерывное вытеснение газовым потоком паров масла со стороны подшипника и утечек газа уплотнительной ступени СГУ в свечу сброса газа.

Уплотнения щелевого типа состоит из корпуса, с обеих сторон которого сделаны две цилиндрические щели, в которых установлены графитовые сегменты. При появлении перепада давления азота на цилиндрических щелях происходит герметизирующие действия.

Панель управления СГУ предназначена для очистки газа от механических примесей фильтрами тонкой очистки, поддержания перепада давления газа между уравнивающей линией компрессора и давлением газа на входе в СГУ, при обеспечении необходимых параметров на входе в панель управления. На панели управления контролируется работоспособность узлов СГУ посредством мониторинга утечек после первой ступени узла СГУ, а также контролирует подачу барьерного азота в наружное ступенчатое лабиринтное уплотнение.

Система буферного газа предназначена для подвода буферного газа от стационарной сети к панели СГУ. При стационарной работе КС подвод буферного газа обеспечивается из выходного коллектора, где давление газа составляет 11,76 МПа, при запуске же КС, когда давление на выходе низкое используется дожимная компрессорная станция (ДКС). В остальное время ДКС находится не в рабочем состоянии. Перепад давления газа на входе и буферного газа должен составлять 0,01 МПа, для поддержания постоянного перепада давления используется регулятор перепада давления.

Система барьерного газа (азота) обеспечивает подачу азота из азотной компрессорной станции в панель управления СГУ и в ГТУ в качестве приборного газа через блок фильтров. Азот получается на азотной станции с помощью мембранных модулей. Мембранные модули, разделяют поток воздуха на два потока: поток газов, проникающих через мембрану и остаточный поток газов.

					<i>Оценка технологической надежности компрессорной станции</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		53

Разделение воздуха происходит за счет различных коэффициентов проницаемости азота и кислорода через полимерную мембрану. Движущей силой разделения является разность парциальных давлений газов на мембране.

Основываясь на все вышеперечисленное, построим структурную схему надежности работы всех ГПА. Однако, существует некоторый нюанс не позволяющий построить последовательно-параллельную структурную схему, которая ранее использовалась для оценки надежности КС. Невозможность использования данной схемы объясняется тем, что система, обеспечивающая подачу азота, в отличие от всех других систем, является общей для всей станции. В случае, если структура не может быть представлена в виде комбинаций последовательных и параллельных соединений, строятся структурно-сложные, или же неприводимые, системы.

Поэтому в данном случае рекомендуется использовать неприводимые схемы надежности систем.

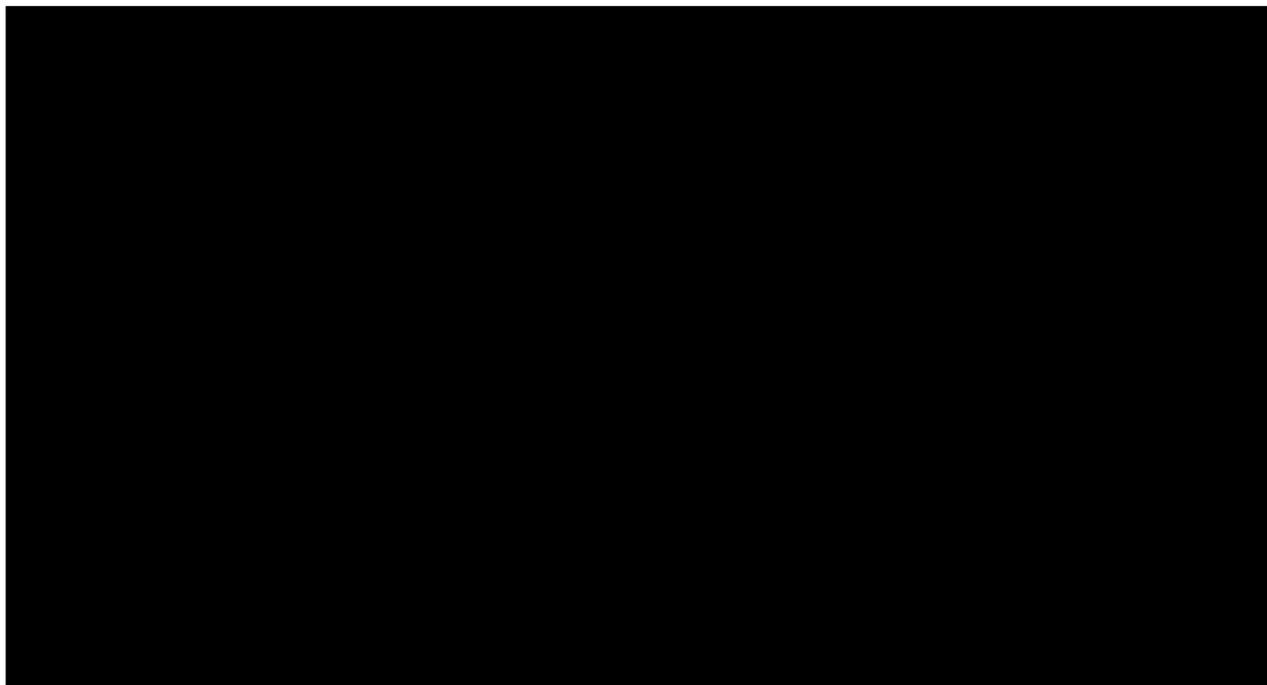


Рисунок 2.8 – Неприводимая схема надежности ГПА

Для анализа и оценки надежности сложных структур используется методы путей и сечений. Для начала необходимо определиться с понятием путь и сечения неприводимых структур.

					Оценка технологической надежности компрессорной станции	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

Путем можно назвать связь элементов, при работоспособном состоянии которых обеспечивается работоспособное состояние системы. Иными словами, это набор элементов на схеме, обеспечивающий связь первого и последнего элемента системы. Для оценки надежности системы аккумулируют с понятием минимальный путь. Минимальный путь же представляется собой путь, в котором удаление любого одного элемента приводит к тому, что оставшееся множество элементов уже не будет путем.

Сечением называется множество элементов, отказ которых приводит к отказу системы. Удаление соответствующих элементов из логической схемы приводит к нарушению связи между входом и выходом схемы. Минимальным же сечением называется комбинация элементов при удалении любого одного элемента приводит к тому, что оставшееся множество элементов уже не будет сечением [2].

Для приведения сложных и произвольных структурных схем к эквивалентным последовательно-параллельным схемам можно использовать логическую сумму всех множеств минимальных путей. В таком случае структурная функция работоспособности может быть представлена следующей функцией:

$$S(X) = 1 - \prod_{j=1}^r \left(1 - \prod_{i \in A_j} x_i \right) \quad (2.6)$$

где, $\prod_{i \in A_j} x_i$ – арифметическое произведение элементов системы, входящих в j -ый минимальный путь;

A_j – множество всех минимальных путей.

Используя выражение можно вывести функцию работоспособности ГПА:

По рис. 2.8 видно, при отказе системы подачи азота вся система приводится к состоянию отказа. Выхода из строя азотной станции чревато отказом всей компрессорной станции, т.к. без барьерного азота невозможно работа центробежного нагнетателя по причине опасности утечки природного газа.

2.3.4. Внесение изменений в схему КС для повышения показателя надежности

С целью повышения надежности системы подачи азота, газоперекачивающих агрегатов и антипомпажных регулирующих клапанов, предлагается ввести в эксплуатацию, в качестве резервной, мобильную азотную станцию [REDACTED] [REDACTED] путем включения её в трубопроводную обвязку стационарной азотной станции согласно схеме (приложение Б).

Для включения мобильной азотной станции к обвязке стационарной азотной станции необходимо произвести следующие:

1. приварка трубы к выходному фланцу мобильной азотной станции;
2. врезка тройника в коллектор стационарной азотной станции;
3. приварка крана шарового к тройнику;
4. приварка фланцевого соединения между краном и трубой;
5. монтаж трубопровода с манометром;
6. изготовление и установка опорных кронштейнов под трубопровод;
7. монтаж дренажного трубопровода с греющим кабелем;
8. монтаж трубопровода между коллекторами высокого и низкого давления с запорной арматурой и врезкой тройника в коллектор высокого давления.

Применение мобильной азотной станции необходимо в случае возникновения отказа основного оборудования стационарной азотной станции. Принцип ввода мобильной азотной станции заключается в подаче газообразного азота давлением [REDACTED] в ресиверы низкого давления [REDACTED] и в [REDACTED]. Азот, поступающий в ресиверы [REDACTED], является азотом барьерным, необходимым для подачи в систему СГУ, а также для продувки

					Оценка технологической надежности компрессорной станции	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

газопроводов. Азот поступающий в [REDACTED] далее поступает на компрессор дожимной [REDACTED] который в свою очередь компримирует азот до давления [REDACTED]. Сжатый азот является импульсным, необходимым для управления антипомпажными клапанами. По окончании сжатия, импульсный азот поступает в [REDACTED]

Ввод в работу мобильной азотной станции, на случай отказа стационарной азотной станции, подразумевается в двух режимах: ручном и автоматическом.

При возникновении отказа оборудования стационарной азотной станции [REDACTED], производится запуск мобильной азотной установки, открывается кран подачи азота 1мб и, по мере наполнения ресивера [REDACTED], в ручном режиме запускаются дожимные компрессора [REDACTED]. Данный режим работы позволяет произвести испытания схемы подключения.

При возникновении отказа оборудования стационарной азотной станции закрываются краны [REDACTED], производится запуск мобильной азотной установки, открывается кран подачи азота [REDACTED] и в автоматическом режиме запускаются дожимные компрессора [REDACTED]

Для оперативного заполнения ресивера высокого давления, линии импульсного азота, необходимо произвести монтаж трубопровода-перемычки между коллекторами низкого и высокого давления.

После введения в эксплуатацию мобильной азотной станции структурная схема надежности будет иметь вид (рис.2.9).

					Оценка технологической надежности компрессорной станции	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

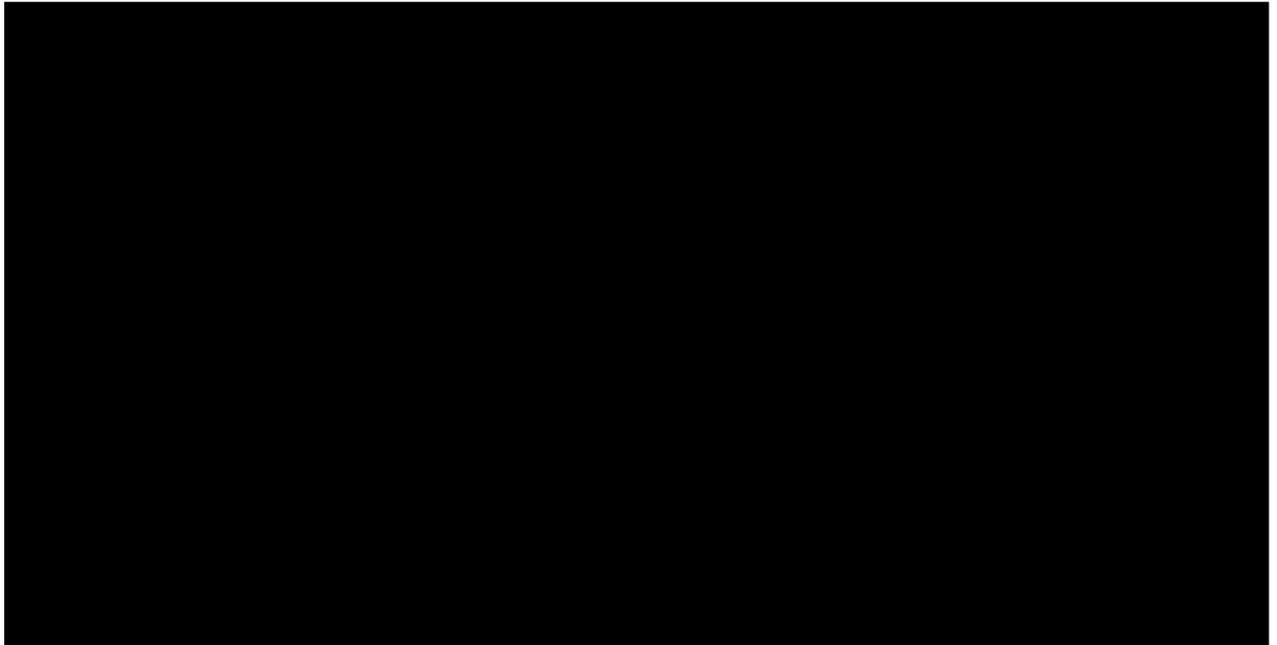
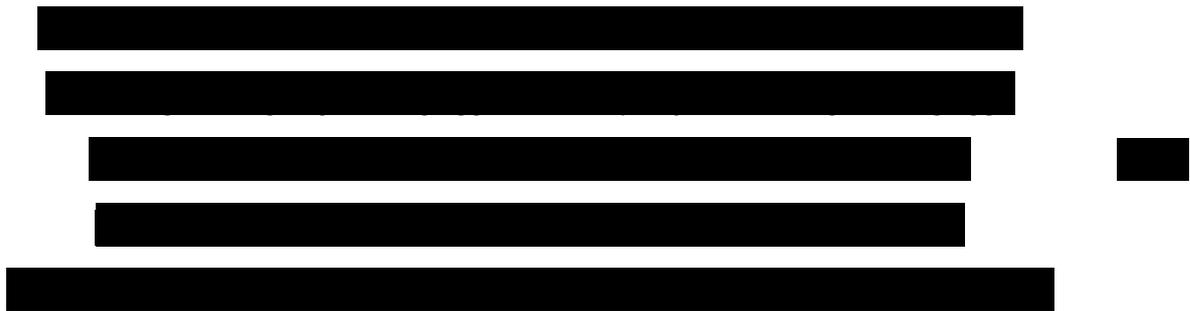


Рисунок 2.9 – Структурная схема надежности КЦ после введения в эксплуатацию мобильной азотной станции

Функция работоспособности будет иметь вид:



В результате после введения в эксплуатацию мобильной азотной станции, в роли резервного источника азотного газа, показатель надежности (вероятность безотказной работы увеличился от исходного значения 0,658 до 0,883.

2.4.Метод статистического анализа надежности КС

2.4.1. Обработка исходных данных

Для построения статистической модели надежности технологического оборудования КС исходные данные – информация об отказах оборудования и систем. На табл. 2.2 представлены данные об отказах оборудования и систем на КС, данные были собраны с [redacted]

					Оценка технологической надежности компрессорной станции	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

Существуют несколько способов определения числа интервалов. Первый способ заключается в выборе числа интервалов по табл.2.3.

Таблица 2.3 – Число интервалов зависимости от количества данных в выборке

N	25-40	40-50	60-100	100	100-160	160-250	250-400
k	6	7	8	10	11	12	13

Второй способ заключается в вычислении числа интервалов с помощью формулы Стерджеса:

$$k = 1 + 3,2 \log N \quad (2.10)$$

Поскольку формула является эмпирической, а не строго полученной путем аналитических выкладок, то в практике обработки статической информации, также используются следующие вариации формулы:

$$k = (1 + 3,2 \log N) + 1 \quad (2.11)$$

$$k = (1 + 3,2 \log N) - 1 \quad (2.12)$$

В данном случае первый способ не уместен, потому что небольшое количество отказов. Поэтому для определения количества интервалов уместней всего будет использовать формулу 2.11. В результате получится:



Исходя от количества интервалов необходимо определить величину интервала Δt . Величина интервала Δt равна разности между максимальным и минимальным значениями наработки, поделенная на количество интервалов:



2.4.2. Построение статистической модели надежности

Далее для построения статистической модели нужно подсчитать количество отказов в каждом интервале и число отказов к моменту. Числом отказов к моменту называется суммарное число отказов в текущем интервале,

вычисленное для середины интервала. Полученные значения представлены на табл. 2.4

Таблица 2.4 – Результаты обработки статистических данных по отказам

■	■	■	■	■
■	■	■	■	■
■	■	■	■	■
■	■	■	■	■
■	■	■	■	■
■	■	■	■	■

На основе рассчитанных данных (табл.2.4) определяются такие показатели как: вероятность отказов на середине интервала $F_{ci}(t)$ и вероятность безотказной работы на середине интервала $P_{ci}(t)$. Оба этих показателя определяются по формулам:

$$F_{ci}(t) = \frac{n_i(t)}{N} \quad (2.14)$$

$$P_{ci}(t) = 1 - F_{ci}(t) \quad (2.15)$$

где, $n_i(t)$ – число отказов к моменту;

N – суммарное количество отказов

Вероятность отказа и вероятность безотказной работы в интервалах времени представлены на табл.2.5.

Таблица 2.5 – Результаты расчетов по вероятностям отказов и безотказной работы

■	■	■	■
■	■	■	■
■	■	■	■
■	■	■	■
■	■	■	■
■	■	■	■

2.4.3. Выдвижение гипотезы о законе распределения

На данном этапе получены значения надежности технологического оборудования КС на основе данных об отказах. Следующем этапом исследования технологической надежности КС является определение закона распределения показателя надежности, а в нашем случае – вероятность безотказной работы.

Определение закона распределения может выполняться тремя различными способами:

1. Анализ физического механизма возникновения отказов;
2. Анализ гистограммы по обработанным статистическим данным;
3. Использование классификаций видов распределения для характерных отказов.

В предыдущей главе был приведен физический механизм возникновения отказов в зависимости от периода эксплуатации. Для анализа путем построения гистограммы статистических данных необходима более обширная выборка данных для более точного заключения вида и характера распределения отказов. Поэтому в данном примере используется третий способ. Существующая классификация видов распределения (табл.2.6) основана по накопленному практическому опыту, отраженному в литературных источниках.

Таблица 2.6 – Законы распределения, характеризующие отказы на газонефтегазотранспортных объектах

№	Наименование закона распределения	Описание
1	Вейбулла-Гнеденко	Является хорошей регрессивной моделью интенсивности отказов λ , возникающих в результате износа и старения. Оно применимо для описания усталостных отказов оборудования
2	Экспоненциальный	1. Наиболее часто используется для описания времени безотказного функционирования технического оборудования. 2. Не применим для элементов, в процессе эксплуатации которых происходят необратимые физические и химические процессы старения. Для них интенсивность отказов во вре-

		<p>мени может оставаться неизменной.</p> <p>3. Применим для описания времени безотказного функционирования устройств с движущимися частями,</p> <p>4. Применяется для описания отказов линейной части магистральных трубопроводов.</p> <p>5. Компрессорные и насосные станции, состоящие из многих элементов, характеризующихся не экспоненциальными распределениями времени безотказной работы с достаточно хорошим, можно описать экспоненциальным приближением.</p>
3	Гамма распределение	Весьма подходит для описания надежности некоторых резервных систем– НПС, КС, ГРС и других, в которых время безотказного функционирования составных элементов описывается экспоненциальным распределением.
4	Эрланга	Описывает продолжительность технического обслуживания трубопроводных систем нефти и газа
5	Нормальное распределение	Отказы, вызванные только износом и старением

В дальнейшем при построении теоретической модели надежности КС воспользуемся несколькими законами распределения отказов, в частности, экспоненциальным законом и законом Вейбулла-Гнеденко, и в итоге определим какой закон распределения является наиболее достоверной.

2.4.4. Построение теоретической модели надежности

Определив гипотезы о законе распределения отказов и безотказной работы можно приступить к построению теоретической модели надежности одним из методов моделирования. Существуют различные построения теоретических моделей надежности, вот некоторые из них: метод наименьших квадратов, метод экспоненциальной регрессии и графический метод. Все эти методы можно реализовывать в офисной программе Excel.

					Оценка технологической надежности компрессорной станции	Лист
						63
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Метод наименьших квадратов заключается в подборе таких переменных x в функции $y_T = f(x)$, которые могли бы максимально приблизить значения y_i в точке x_i к известному значению y .

Первая теоретическая модель будет выдвинута по гипотезе экспоненциального распределения безотказной работы и будет иметь зависимость:

$$P_T(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.16)$$

Воспользовавшись методом наименьших квадратов, выведем формулу, которая будет определять величину всех отклонений при заданных значениях:

$$F = \sum_{i=1}^k (P_{ci}(t) - e^{-\lambda t})^2 \quad (2.17)$$

В дальнейшая работа заключается в подборе такого значения интенсивности отказов λ , которая приводило бы формулу к следующему виду:

$$\sum_{i=1}^k (P_{ci}(t) - e^{-\lambda t})^2 \rightarrow \min \quad (2.18)$$

Для решения данной задачи использовалась специальная функция, предусмотренная в программе Excel, под названием «Поиск решения».

Воспользовавшись «Поиском решения», была выведена экспоненциальная функция зависимости вероятности безотказной работы оборудования КС от наработки:

$$P_T(t) = e^{-0,039t} \quad (2.19)$$

Таким же способом, через метод наименьших квадратов можно вывести функцию безотказной работы по закону распределения Вейбулла-Гнеденко.

$$P_T(t) = e^{-at^k} \quad (2.20)$$

где, a, k – параметры, определяемые методом наименьших квадратов.

Воспользовавшись методом наименьших квадратов, были получены следующие значения параметров $k = 1,113$ $a = 0,002$ и функция распределения

вероятности безотказной работы оборудования КС по закону распределения Вейбулла-Гнеденко:

$$P_T(t) = e^{-0,002t^{1,113}} \quad (2.21)$$

Перед проверкой и определением более достоверной гипотезы распределения используем оставшиеся методы построения моделей надежности.

Метод экспоненциальной регрессии описывает экспоненциальный закон распределения безотказной работы. Экспоненциальная модель в данном методе описывается уравнением:

$$P_T(t) = (e^{-\lambda})^t \quad (2.22)$$

Интенсивность отказов определяется через параметр m , которая вычисляется встроенной функцией Excel, «Логарифмическое приближение». В результате модель безотказной работы, построенная методом экспоненциальной регрессии, имеет вид:

$$P_T(t) = (e^{-0,0046})^t \quad (2.23)$$

Последним рассматриваемым методом является графический метод. В программе Excel строится график зависимости статистической вероятности безотказной работы от времени. На основе данного графика выделяется линия тренда, определяемая экспоненциальной зависимостью (рис.2.10). В итоге функцию безотказной работы и ее коэффициент детерминации, которая определяет достоверность модели.

					Оценка технологической надежности компрессорной станции	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		65

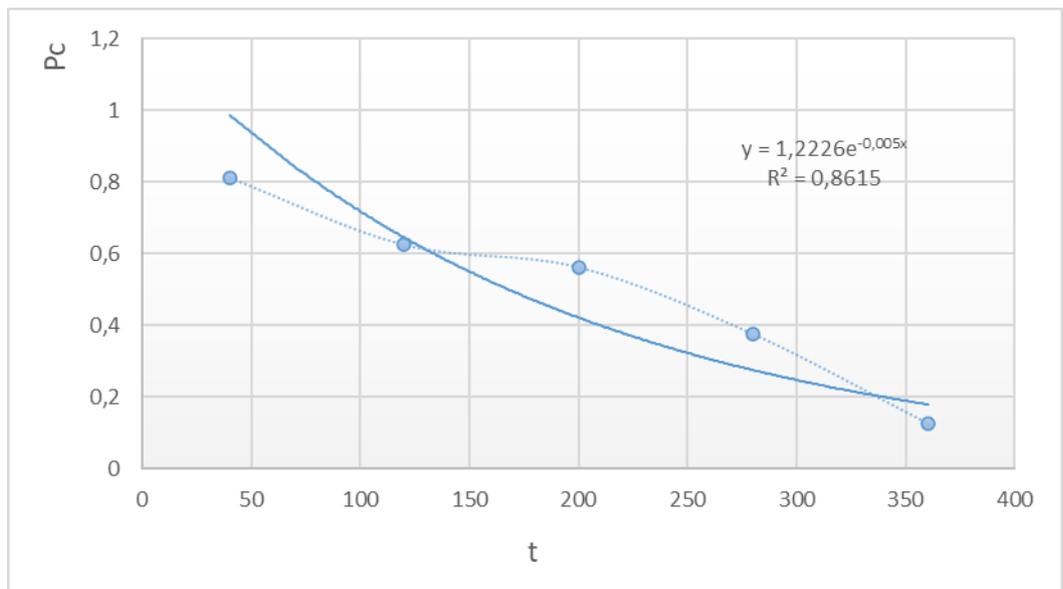


Рисунок 2.10 – Графический метод – построение линии тренда

В результате на основе полученных теоретических моделей надежности, а также ранее вычисленного статистической вероятности безотказной работы получим теоретические значения безотказной работы КС, представленные на табл.2.7.

Таблица 2.7 – Результаты вероятности безотказной работы КС

2.4.5. Проверка достоверности теоретических моделей надежности

Проверка гипотез и моделей надежности можно выполнять несколькими методами. Наиболее распространенные из них: корреляционный анализ, вычисление критериев согласия Пирсона и Колмогорова.

Корреляционный анализ заключается в выявлении взаимосвязи одного показателя к другому. Взаимосвязь устанавливается путем изучения коэффициента корреляции. Значение коэффициента корреляции находится в диапазоне $-1 \leq r_{xy} \leq 1$. При $r_{xy} = -1$ два исследуемых показателя являются абсолютно отрицательно коррелируемы, при $r_{xy} = 1$ – абсолютно положительную коррелируемы. В обоих случаях показатели будут 100% связь друг с другом. При оценке моделей надежности коэффициент корреляции будет показывать достоверность модели, т.е. чем больше будет коэффициент корреляции, тем более модель будет правдивой и тем лучше сможет прогнозировать вероятность безотказной работы.

Коэффициент корреляции вычисляется следующей формулой:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n - 1)\sigma_x\sigma_y} \quad (2.24)$$

где, x_i, y_i – статистические и теоретические значения вероятности безотказной работы;

\bar{x}, \bar{y} – средние значения статистической и теоретической вероятности безотказной работы;

σ_x, σ_y – среднее квадратичные отклонения, которые определяются по формулам:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (2.25)$$

Используя формулы 2.24 и 2.25 определим коэффициенты корреляции между теоретическими и статистическими значениями безотказной работы. Исходные значения указаны в табл. 2.7. Коэффициент корреляции для экспоненциальной гипотезы распределения равна:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = \blacksquare, \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} = \blacksquare$$

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n - 1)\sigma_x\sigma_y} = \blacksquare$$

Таким же способом определяются коэффициенты корреляции для оставшихся методов. Результаты расчётов представлены на табл.2.8

Таблица 2.8 – Коэффициенты корреляции моделей безотказной работы КС

	r_{12}	r_{13}	r_{14}	r_{15}
r_{21}		r_{23}	r_{24}	r_{25}
r_{31}	r_{32}		r_{34}	r_{35}
r_{41}	r_{42}	r_{43}		r_{45}
r_{51}	r_{52}	r_{53}	r_{54}	

Как видно, оба гипотезы имеет одинаковое значение корреляционные значения. В случае метода построения теоретических моделей можно сказать, что наиболее точно интерполирует данные метод наименьших квадратов.

Еще одним инструментом позволяющим оценить достоверность построенной модели является критерий согласия Пирсона, или χ^2 -критерий. На основании χ^2 -критерия делается вывод о противоречии или не противоречии теоретической модели по отношению статистической.

Для проверки правдоподобности построенной модели, соответствующей выдвинутой гипотезе, вводится мера расхождения статистического распределения с гипотетическим R:

$$R = \sum_{i=1}^k c_i \cdot (p_i^* - p_i)^2 \quad (2.26)$$

где, c_i – весовой коэффициент;

$(p_i^* - p_i)^2$ – квадрат отклонений статистической вероятности p_i^* от теоретической вероятности p_i .

Введение коэффициента обусловлено тем, что отклонения, относящиеся к разным значениям p_i , нельзя считать равноправными по значимости. Одно и то же по абсолютной величине отклонение $p_i^* - p_i$ – может быть малозначительным, если сама вероятность p_i велика, и очень заметным, если она мала.

Каким же способом проверяется гипотеза с использованием X^2 - критерия? Способ нахождения X^2 - критерия заключается в определении меры расхождения теоретического и статистического моделей по формуле:

$$X^2 = n \cdot \sum_{i=1}^k \frac{(p_i^* - p_i)^2}{p_i} \quad (2.27)$$

После определяется число степеней свободы s :

$$s = k - c - 1 \quad (2.28)$$

где, k – число разрядов;

c – число независимых условий, наложенных на частоты p_i^* .

В общем случае количество степеней свободы s меньше наблюдений на число имеющихся зависимостей.

Определив значения степени свободы, выбирается уровень значимости α для нахождения критического значения $X^2_{1-\alpha}(s)$. $X^2_{1-\alpha}(s)$ устанавливается по таблице квантиля представленный в приложении В.

В случае, если наблюдаемое значение $X^2 > X^2_{1-\alpha}(s)$, то гипотеза отвергается, в ином случае, если $X^2 \leq X^2_{1-\alpha}(s)$ то гипотеза не отвергается.

Для проверки гипотезы экспоненциального распределения вероятности безотказной работы $P_T(t) = e^{-0,039t}$ уровень значимости будет составлять $\alpha = 0,05$ (уровень доверия составит 95%).

На табл.2.9 представлены расчетные значения представленной гипотезы, необходимые для выполнения дальнейших расчетов.

Таблица 2.9 – Расчетные значения гипотезы экспоненциального распределения

■	■	■	■	■	■	■	■
■	■	■	■	■	■	■	■
■	■	■	■	■	■	■	■
■	■	■	■	■	■	■	■
■	■	■	■	■	■	■	■
■	■	■	■	■	■	■	■

$nP_T(t)$ – это произведение общего числа отказов m на значения гипотетических вероятностей в каждом интервале $P_T(t)$

На основе существующего практического опыта применения критерий согласия Пирсона выявлено что, данный способ проверки достоверности теоретической модели работает эффективнее в том случаи, если все ожидаемые частоты $np_i \geq 10$, или, чтобы в каждом интервале было достаточное количество наблюдений, по крайней мере не менее 5 наблюдений. Для этого при необходимости объединяют некоторые соседние классовые интервалы. При вычислении числа степеней свободы в качестве k берется соответственно уменьшенное число интервалов.

Так как в данном случае во всех пяти интервалах $np_i < 10$, требуется сложить значения всех пяти строк. В этом случаи будет только один интервал с частотой отказов [REDACTED], со статистическим и теоретическим значением вероятности безотказной работы [REDACTED] соответственно. В таком случаи [REDACTED], что соответствует вышесказанному.

С помощью полученных данных определяется расхождения статистического распределения с гипотетическим по формуле 2.27

$$[REDACTED]$$

Число степени свободы s для данного случая будет равняться 0, что является отрицательным моментом. Для возможности дальнейшего решения задачи примем что $s = 1$.

Для выбранного уровня значимости $\alpha = 0,05$ и степени свободы $s = 1$ по таблице квантили распределения (приложение В) критическое значение $X^2_{1-\alpha}(s)$ будет составлять [REDACTED]

Данную модель можно считать не противоречащей статистическим данным, а гипотезу экспоненциального распределения вероятности не отвергать, т.к. фактическое наблюдаемое значение X^2 меньше критического $X^2_{1-0,05}(1)$.

[REDACTED]

При проверке гипотезы распределения Вейбула-Гнеденко были получены следующие значения (табл.2.10)

Таблица 2.10 – Расчетные значения гипотезы распределения по закону Вейбула-Гнеденко

[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]

Гипотеза распределения по закону Вейбула-Гнеденко также не противоречит статистическим данным и может не отвергаться.

[REDACTED]

Однако, при расчете число разряда k для данных случаев состояла только из одной строки и была равна 1. Для получения более достоверной оценки гипотезы необходимо иметь не менее 5 строк. Это можно обусловлено, тем что критерий согласия Пирсона работает с большой выборкой данных коим, к сожалению, данный пример не является. Для выборки с небольшим количеством данных широко применяются критерий согласия Колмогорова.

Критерии согласия Колмогорова выгодно отличается своей простотой от критерия Пирсона. В качестве меры расхождения в данном методе рассматривается максимальное значение модуля разности между статистической функцией распределения $F^*(X)$ и соответствующей теоретической функцией распределения, определяемое формулой:

$$D = \max|F^*(X) - F(X)| \tag{2.29}$$

Оценка достоверности гипотезы критерием согласия Колмогорова выполняется рядом последовательных действий: определение меры расхождения D теоретического и статистического параметра по формуле 2.29 и вычисление величины критерия Колмогорова η :

$$\eta = D\sqrt{n} \tag{2.30}$$

Установка уровня значимости α от которого определяется критическое значение критерия Колмогорова η_α . В случаи $\eta > \eta_\alpha$, гипотеза отвергается, а если $\eta \leq \eta_\alpha$ то считается, что гипотеза не противоречит статистическим данным.

Для определения достоверности критерием Колмогорова необходимо построить таблицу для внесения промежуточных результатов решения. Используя формулы (2.29 и 2.30) определим значения модуля разности и значение критерия Колмогорова

Таблица 2.11 – Определение меры расхождения D между гипотезой экспоненциального распределения и статистических данных

■	■	■	■	■	■	■	■	■
■	■	■	■	■	■			
■	■	■	■	■	■			
■	■	■	■	■	■			
■	■	■	■	■	■			
■	■	■	■	■	■	■	■	■

Критическое давление Колмогорова при уровне значимости $\alpha = 0,05$ составляет $\eta_\alpha = 1,36$. Так как условие $\eta \leq \eta_\alpha$ выполняется, то можно сделать вывод, что гипотеза экспоненциального распределения не противоречит статистическим данным.

Результаты расчетов проверки достоверности критерием согласия Колмогорова закона распределения Вейбула-Гнеденко представлено на табл. 2.12

Таблица 2.12 – Определение меры расхождения D между гипотезой экспоненциального распределения и статистических данных

■	■	■	■	■	■	■	■	■
■	■	■	■	■	■			
■	■	■	■	■	■			
■	■	■	■	■	■			
■	■	■	■	■	■			
■	■	■	■	■	■	■	■	■

В данном случае гипотеза так же не отвергается, т.к. условие $\eta \leq \eta_a$ выполняется.

В данной главе была проведена оценка показателей надежности, а именно вероятности безотказной работы, двумя методами: методом построения структурных схем и анализом статистических данных. По результатам расчетов были определены количественные значения надежности КС, в частности отдельных систем и оборудования. По итогам оценки надежности были разработаны рекомендации с целью повышения показателей надежности, а также выдвинуты гипотезы по распределению безотказной работы, которые могут быть использованы для прогнозирования вероятностей отказа.

					<i>Оценка технологической надежности компрессорной станции</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		73

3. Конструкционные решения при проектирования рабочего колеса центробежного нагнетателя

Центробежные нагнетатели играют важную роль при транспортировке газа, поэтому надежность и долговечность работы ЦБН имеет большое значение. Также, кроме этого, важно учитывать, что современные технологии должны быть более энергоэффективные по требованиям политике энергосбережения.

В процессе эксплуатации рабочее колесо (РК) нагнетателя подвергается большому количеству нагрузок, что влияет на прочностные качества и долговечность конструкции. Прочность и долговечность рабочих колес зависит от их напряженного состояния под действием различных сил, а также от степени эрозионного износа.

Разрабатывая новые нагнетатели, конструкторы обычно руководствуются следующими требованиями:

1. Необходимость обеспечения высокой надежности при любых возможных режимах эксплуатации.
2. Необходимость в получении максимальной экономичности, которая определяется целесообразными затратами на ее обеспечение.
3. Производственная, транспортная, монтажная, эксплуатационная технологичность. Под технологичностью здесь понимается минимизация трудовых и материальных затрат соответственно на изготовление, транспортировку, монтаж, эксплуатацию и ремонт в конкретных предусмотренным заказом условиях выполнения этих операций.
4. Приспособленность конструкции к разнообразию условий применения и переменному режиму работы газопровода. Связанно с заданными способами регулирования и со схемой включения нагнетателей (параллельное или последовательное).

					<i>Разработка мероприятий по повышению надежности технологического оборудования компрессорной станции</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Винокуров Т.С.</i>			<i>Конструкционные решения при проектирования рабочего колеса центробежного нагнетателя</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		<i>Шадрина А.В.</i>					74	141
<i>Консульт.</i>						<i>НИ ТПУ гр. 2БМ01</i>		
<i>Рук-ль ООП</i>		<i>Шадрина А.В.</i>						

При проектировании ЦБН, его масса, так как узел стационарный, жестко не ограничивается.

В настоящее время одним из перспективных направлений является применения композитных материалов в различных отраслях. В том числе и в нефтегазовой отрасли, в частности и при проектирования рабочих колес центробежных компрессоров.

Композитные материалы – многокомпонентные материалы, объединённые макромолекулярным соединением. Каждый компонент материала имеет различные физико-химические свойство, а при комбинации друг с другом приводят к созданию нового материала совсем уже другими свойствами. Современные композитные по своим свойствам являются отличными аналогами к традиционным материалам.

Исходя из существующих исследований [41,42] можно понять, что существуют так и преимущества, так и недостатки композитных материалов перед своими металлическими аналогами. Вот некоторые из них:

- Существуют ограничения, связанных с разрушением связующих материала. Связующие композитных материалов представляют собой низковязкие жидкости (чаще всего ненасыщенные сложные эфиры или смолы) предназначенные для соединения отдельных частей детали;
- Низкий удельный вес композитных материалов;
- Высокие показатели прочности и предела текучести;
- Низкая эрозионная устойчивость.

Для совершенствования центробежных нагнетателей невозможно обойтись без оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) узлов.

Для проведения оценки прочностных качеств РК ЦБН из композитного материала необходимо создать САД модель объекта исследования. На основе созданной модели и программного аналитического обеспечения Ansys произвести выполнение сравнение прочностных качеств композитных и традиционных материалов.

Ansys представляет собой универсальную программную систему анализа, использующую за свою основу метод конечных элементов (МКЭ). Ansys широко применяют в системе автоматизированного проектирования (САП). Метод конечных элементов является численным методом, позволяющим решать дифференциальные уравнения с частными производными. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твёрдого тела, теплообмена, гидродинамики, электродинамики и топологической оптимизации. Суть метода заключается в разбиении рабочей модели на сетку, состоящую из определенного количества элементов. После этого точно или приближенно изучают НДС каждого конечного элемента методами, известными в строительной механике и теории упругости: сил, перемещений или смешанным, с целью определения в зависимости от принятого метода анализа усилий, или перемещений, или и того и другого в точках соединения конечных элементов между собой (узлах). Эти факторы принимают в качестве основных неизвестных метода конечных элементов. Для нахождения неизвестных составляют и решают систему алгебраических уравнений, как правило, очень высокого порядка (десятки, сотни тысяч и миллионы уравнений).

3.1. Построение САД модели рабочего колеса ЦБН

Перед началом аналитического сравнения необходимо построить САД РК. Создание трехмерной модели производилось в программном комплексе Autodesk Inventor.

Исходные данные для определения геометрических размеров проектируемой модели представлены на табл. 3.1

					<i>Конструкционные решения при проектировании рабочего колеса центробежного нагнетателя</i>	<i>Лист</i>
						76
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Таблица 3.1 – Исходные данные

В начале нужно определить диаметр рабочего колеса на выходе по формуле:

$$D_2 = \frac{60 \cdot U_2}{\pi \cdot n} \quad (3.1)$$



Высоту лопатки на выходе, и также относительную высоту:

$$b_2 = \bar{b}_2 \cdot D_2 \quad (3.2)$$

где, \bar{b}_2 – относительная к диаметру рабочего колеса высота лопатки на входе. Примем $\bar{b}_2 = 0,04$



Окружная составляющая абсолютной скорости на выходе:

$$C_{u2} = \psi_T \cdot U_2 \quad (3.4)$$

где, ψ_T – коэффициент теоретического напора. Диапазон значения $\psi_T = 0,45 - 0,68$. Примем $\psi_T = 0,56$.



Расходная составляющая абсолютной скорости:

$$Cr_2 = \frac{\bar{m}}{\Pi \cdot \rho \cdot \pi \cdot D_2 \cdot b_2} \quad (3.5)$$



Далее определяется угол наклона лопаток на выходе, но для начало найти угол направления потока:

$$\beta_2 = \arctg\left(\frac{Cr_2}{U_2 - Cu_2}\right) \quad (3.6)$$



Разница между углом β_2 и $\beta_{л2}$ находится в диапазоне от 3 до 6. В данном случае применяется разница в 6 градусов:



После рассчитывается относительная скорость на выходе с помощью треугольников скоростей (рис.3.1):

$$W_2 = \sqrt{Cr_2^2 + (U_2 - Cu_2)^2} \quad (3.7)$$

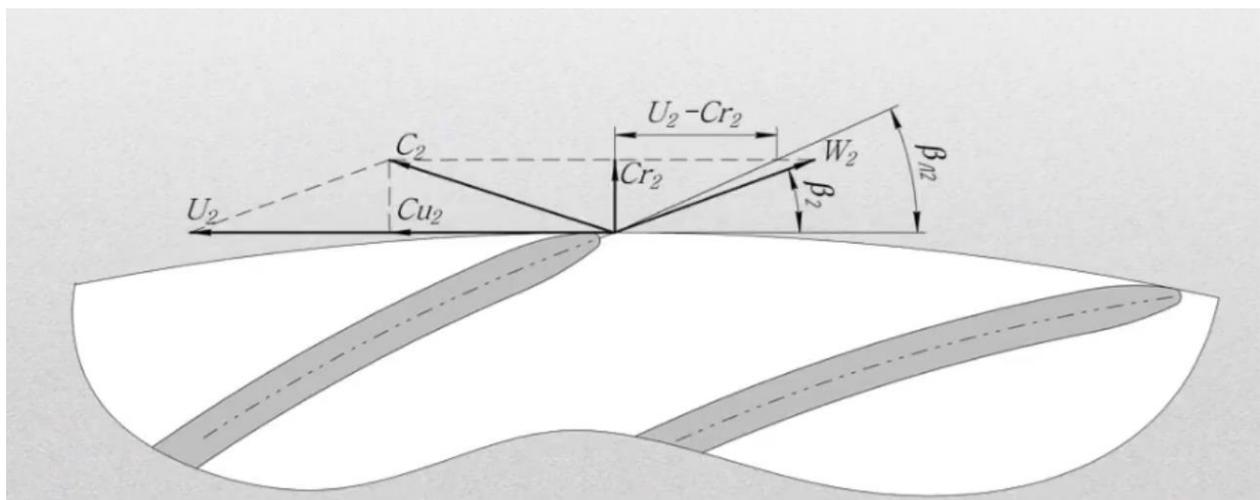


Рисунок 3.1 – Распределение скоростей на выходе РК [11]

Для дальнейшего расчета будут применяться рекомендации основателя компрессорно-строительной школы К. П. Селезнева, поэтому используются следующие относительные размеры РК ($\bar{D}_1 = 0,45$; $\bar{D}_{\text{вТ}} = 0,3$; $\bar{D}_0 = 0,439$). Используя рекомендации определим:

- Диаметр контрольного сечения проточной части:

$$D_1 = \bar{D}_1 \cdot D_2 \quad (3.8)$$



- Диаметр втулки:

$$D_{\text{вТ}} = \bar{D}_{\text{вТ}} \cdot D_2 \quad (3.9)$$



- Диаметр у входа:

$$D_0 = \bar{D}_0 \cdot D_2 \quad (3.10)$$



Ширина лопатки на входе определяется через относительную ширину:

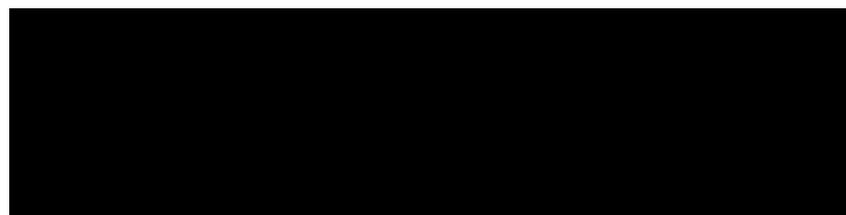
$$b_1 = \bar{b}_1 \cdot D_2 \quad (3.11)$$

где, \bar{b}_1 – относительная ширина лопатки. Примем $\bar{b}_1 = 0,072$



Угол наклона лопаток на входе:

$$\beta_1 = \arctg \left(\frac{K_F \cdot \Phi}{\varepsilon_1 \cdot \left(\left(\frac{\bar{D}_1}{K_D} \right)^2 - \bar{D}_{\text{вТ}}^2 \right) \cdot \bar{D}_1} \right) \quad (3.12)$$



$$\beta_{л1} = \beta_1 + i \quad (3.13)$$

где, i – угол атаки на входе в РК, примем $i = 0$.

Также определим треугольник скоростей на входе (рис.3.2):

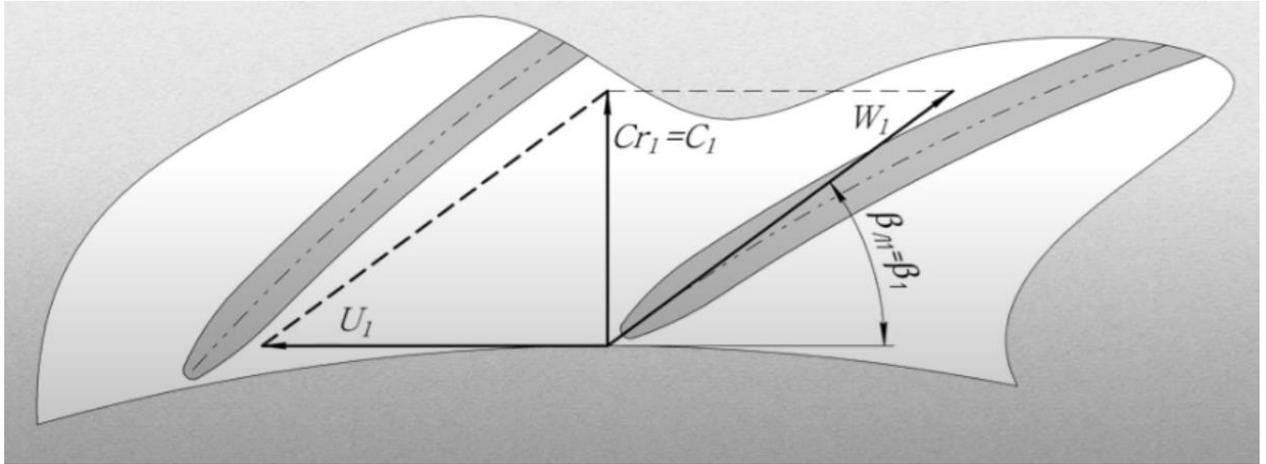


Рисунок 3.2 – Распределение скоростей на входе РК

– Окружная скорость:

$$U_1 = \frac{n \cdot \pi D_1}{60} \quad (3.14)$$

– Абсолютная скорость:

Примем окружную составляющую абсолютной скорости $Cu_1 = 0$, т. к. нет закрутки. Поэтому:

$$C_1 = Cr_1 = U_1 \cdot \tan(\beta_{л1}) \quad (3.15)$$

– Относительная скорость:

$$W_1 = \frac{Cr_1}{\sin(\beta_{л1})} \quad (3.16)$$

После решение всех скоростей остается определить какое количество лопаток будет иметь РК по формуле:

$$z_{\text{опт}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sin(0,5 \cdot (\beta_{\text{л1}} + \beta_{\text{л2}}))}{\frac{t}{l} \cdot \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)} \quad (3.17)$$

где, $\frac{t}{l}$ – относительный шаг эквивалентной прямой решетки, равная 0,4.



Округлим значение в большую сторону $z =$

Определим форму средней линии лопатки и толщину лопатки. Для начала необходимо определить радиус средней линии:

$$R_{\text{л}} = \frac{R_2^2 - R_1^2}{4 \cdot (D_2 \cdot \cos \beta_{\text{л2}} - D_1 \cdot \cos \beta_{\text{л1}})} \quad (3.18)$$

$$R_0 = \sqrt{R_{\text{л}}^2 + 0,25 \cdot D_2^2 - R_{\text{л}} \cdot D_2 \cdot \cos \beta_{\text{л2}}} \quad (3.19)$$

$$\delta = 0,01 \cdot D_2 \quad (3.20)$$



Округлим значение толщины лопатки до следующего целого числа, $\delta = 8$ мм.

Вспомогательные конструктивные размеры меридиональной плоскости:

– Радиус закругления втулки:

$$R_{\text{н}} = b_2 \cdot 1,4 \quad (3.21)$$



- Радиус покрывающего диска:

$$R_s = \frac{D_0 - D_{вт}}{2} \quad (3.22)$$



Все необходимые геометрические размеры и граничные условия работы РК компрессора определены. Однако, перед тем как начать построение трехмерной компьютерной модели необходимо принять некоторые допущения:

- Пренебрежем в расчете влияние газодинамических сил и температур, т. к. по результатам исследования [Ошибка! Источник ссылки не найден.] влияние этих данных не превышает 10 %;
- Толщину стенок покрывающего и основного дисков примем произвольно;
- Отсутствует ротор компрессора, вместо него примем контакт в виде жесткой заделки;
- Принимаем допущение гладкой шероховатости поверхности галтели.

Теперь можно переходить к построению CAD модели РК. На рисунке 3.3 представлена трехмерная компьютерная модель РК ЦБН с расчетными геометрическими размерами.

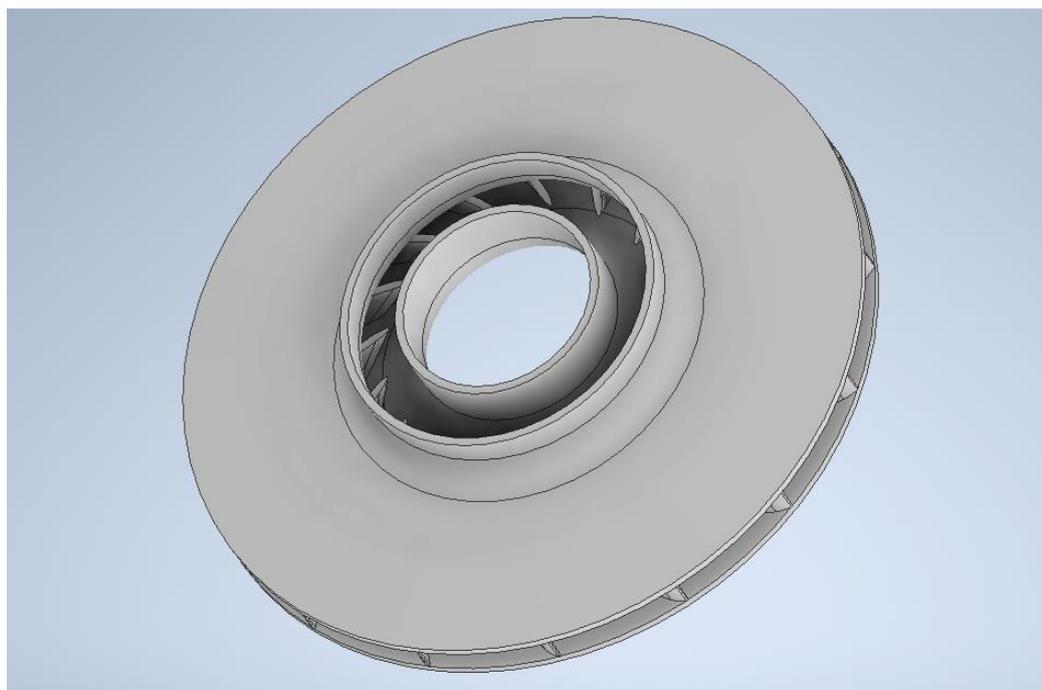


Рисунок 3.3 – CAD модель рабочего колеса

3.2. Сравнение прочностных характеристик РК из стали и композитного материала

Построенная трехмерная модель загружается в рабочую среду программную среду Ansys. Перед тем, как запускать решатель необходимо указать граничные условия, чтобы программа могла рассчитать дифференциальные уравнения.

В конечно-элементных расчетах учитываются свойства материалов. В первом случае укажем значения стали марки 30ХН2МФА с плотностью 7850 кг/м^3 с модулем упругости 216 ГПа. предел текучести – 785 МПа предел прочности- 880 МПа. Во втором случае свойства углеродомагниевого композитного материала на основе металлической матрицы из сплава МЛ-10, свойства которого были исследованы в работе [47] (предел прочности 532 МПа, модуль упругости 142 ГПа, 1800 кг/м^3).

Следующим шагом является воздействующих нагрузок на исследуемую модель. В данной работе будут учитываться только центробежные нагрузки (рис 3.4), т.к. по результатам исследования [Ошибка! Источник ссылки не найден.] было выявлено, что влияние газодинамических сил и температурных нагрузок не превышает 10% от суммарных напряжений.

A: Static Structural
Rotational Velocity
Time: 1, s
11.06.2022 16:09
Rotational Velocity:
Components: 0,0,6750, RPM
Location: 0,0,0, mm

Details of "Rotational Velocity"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0, RPM (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	0, RPM (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	6750, RPM (ramped)
<input type="checkbox"/> X Coordinate	0, mm
<input type="checkbox"/> Y Coordinate	0, mm
<input type="checkbox"/> Z Coordinate	0, mm
Suppressed	No

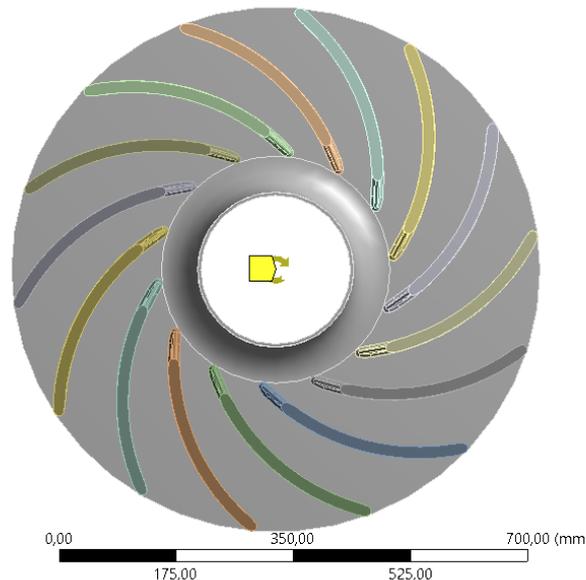


Рисунок 3.4 – Установка центробежных нагрузок

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Результаты моделирования центробежных нагрузок рабочего колеса из стали и композитного материала представлены на рис. При расчете эквивалентных значений напряжения используется формула Мизеса:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3.23)$$

где, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные нормальные напряжения.

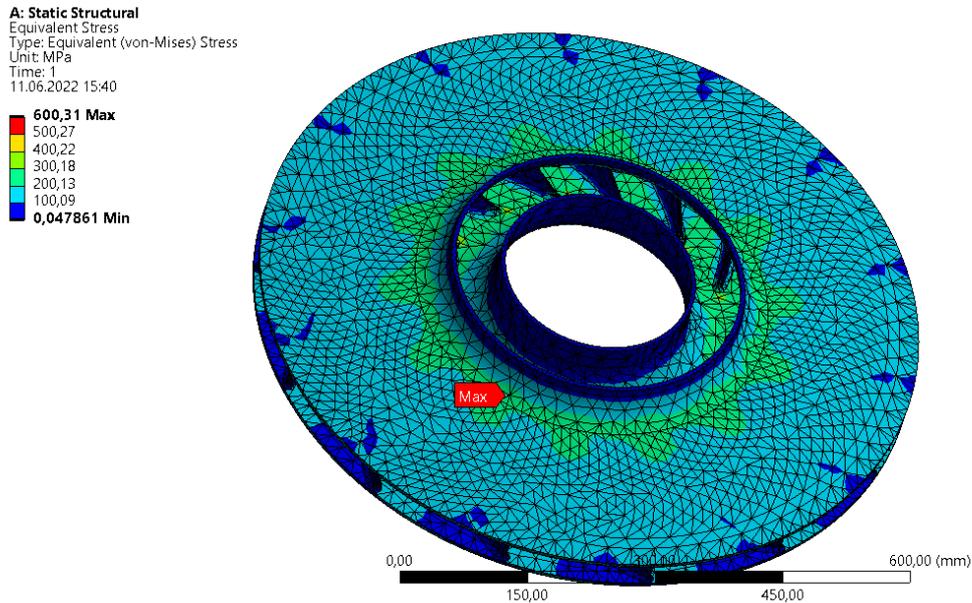


Рисунок 3.5 – Распределение напряжения по Мизесу РК из стали

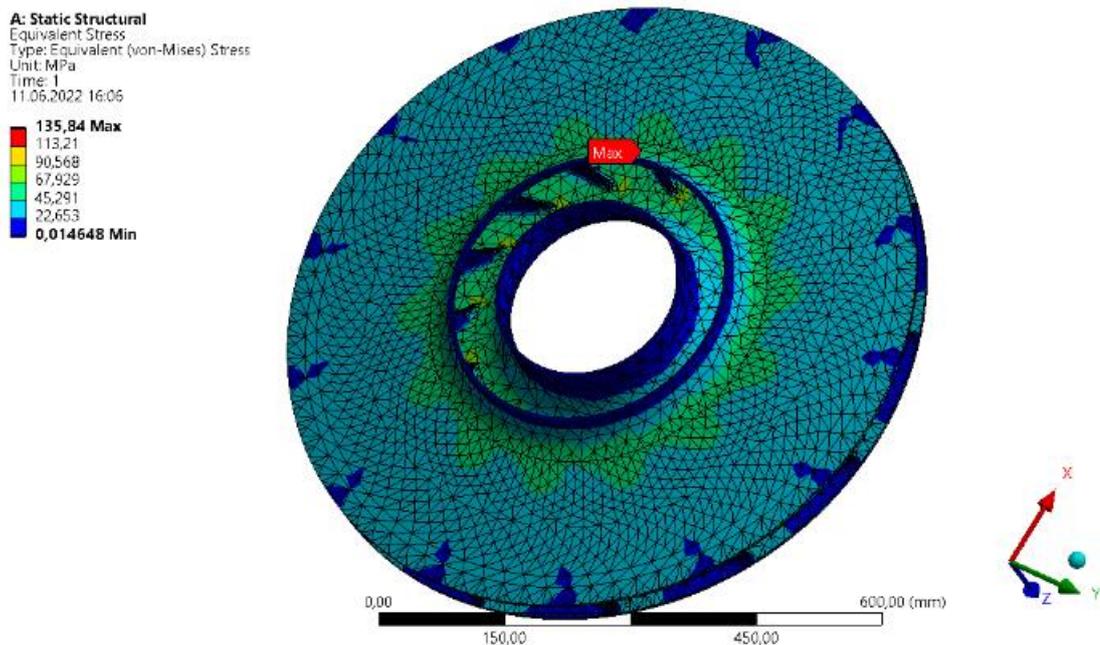


Рисунок 3.6 – Распределение напряжения по Мизесу РК из композита

Как видно из рисунков эквивалентные нагрузки в разы меньше у модели состоящего из композитного материала. Однако, нельзя утверждать, что данный материал прочнее своего аналога в 4-5 раз, поэтому целевой функцией для сравнения прочностных качеств используются значения запаса прочности. При расчете конструкции на прочность по допускаемым напряжениям коэффициент запаса вычисляется по формуле:

$$k = \frac{\sigma_{\text{пр}}}{\sigma_{\text{рас}}} \quad (3.25)$$

где, $\sigma_{\text{пр}}$ – предельно-допустимое напряжение, в данном случае предел прочности материала;

$\sigma_{\text{рас}}$ – расчетное значение напряжения, данном случае $\sigma_{\text{рас}} = \sigma_e$.

Определение запаса прочности так же возможно реализовать в программе Ansys (рис.).

A: Static Structural
Safety Factor
Type: Safety Factor
Time: 1
11.06.2022 15:40

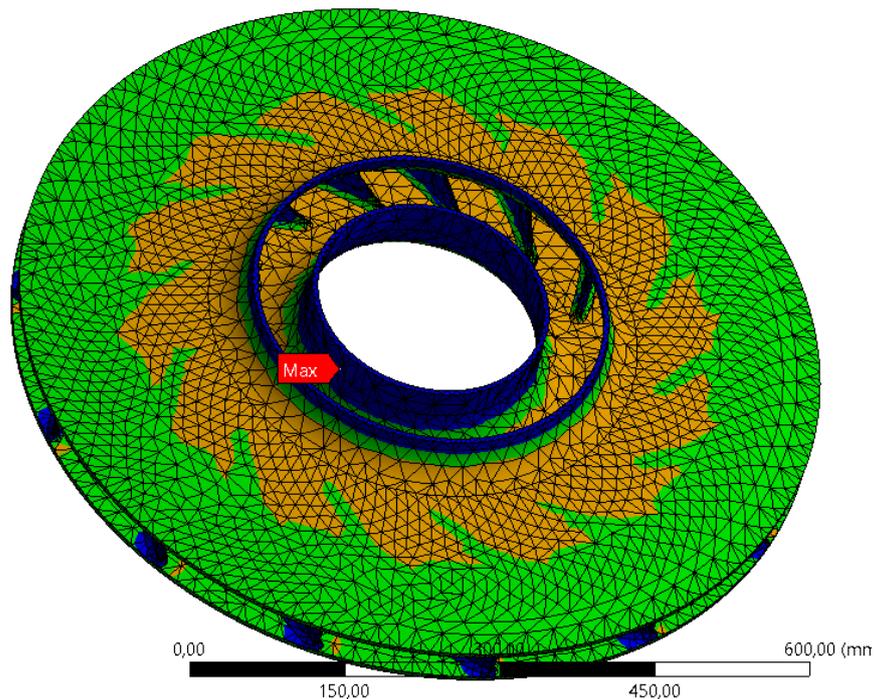
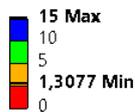


Рисунок 3.7 – Запас прочности РК из стали

A: Static Structural
 Safety Factor
 Type: Safety Factor
 Time: 1
 11.06.2022 16:07

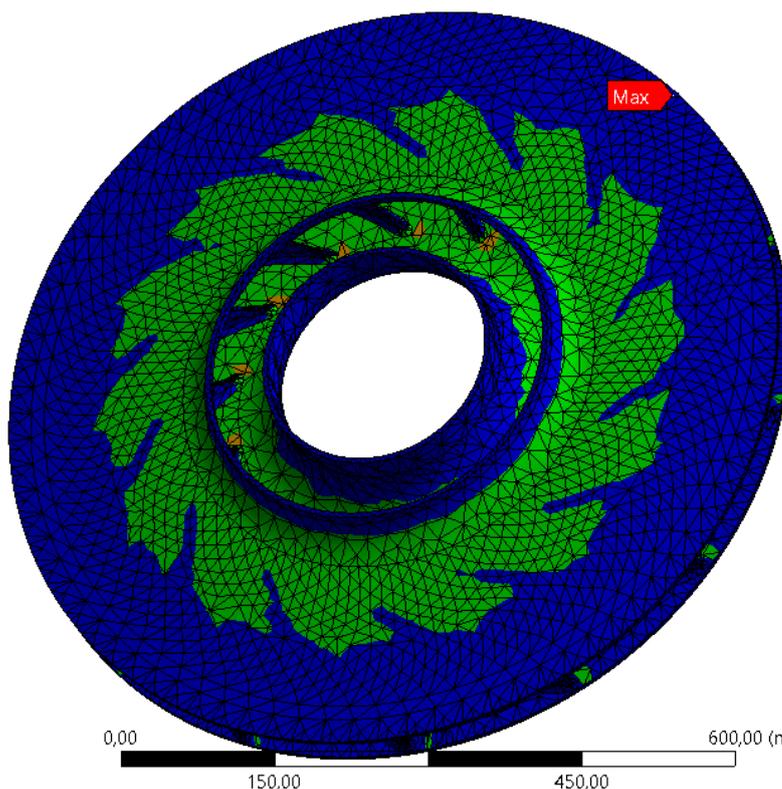
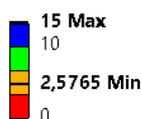


Рисунок 3.8 – Запас прочности РК из композитного материала

Значения запаса прочности для стали марки 30ХН2МФА и композитного материала из углеродомагния составляют 1,30 и 2,57. По результатам оценки напряженно-деформированного состояния РК, подвергаемого центробежным нагрузкам, можно сделать вывод, что композитные материалы имеют хорошие показатели прочности, которые превосходят показатели прочности традиционных металлических аналогов.

3.3. Оценка НДС фрезерованного РК

Одной из причин снижения ресурса центробежных нагнетателей различных конструкций является возникновение и развитие повреждений рабочего колеса в процессе эксплуатации, а также при их изготовлении. В большинстве случаев усталостные поломки возникают из-за интенсивных резонансных колебаний, происходящих вблизи наружного диаметра межлопаточного пространства основного и покрывного диска.

На рабочих колесах цельно-фрезерованной или сварной конструкции трещины чаще всего возникают на периферийной части диска между

					<i>Конструкционные решения при проектировании рабочего колеса центробежного нагнетателя</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		86

лопатками, затем распространяются к центру и приводят к отрыву части диска между лопатками. Не устраненная своевременно трещина приводит к аварии компрессора.

При проявлении различных дефектов или вырыве одной или несколько частей диска на периферии межлопаточного пространства РК на расстоянии от края не превышающий от десятую часть от диаметра диска предлагается выполнять фрезерование типа «ромашка».

Для определения влияния фрезерования на НДС была построена модель с вырезами (рис. 3.9).

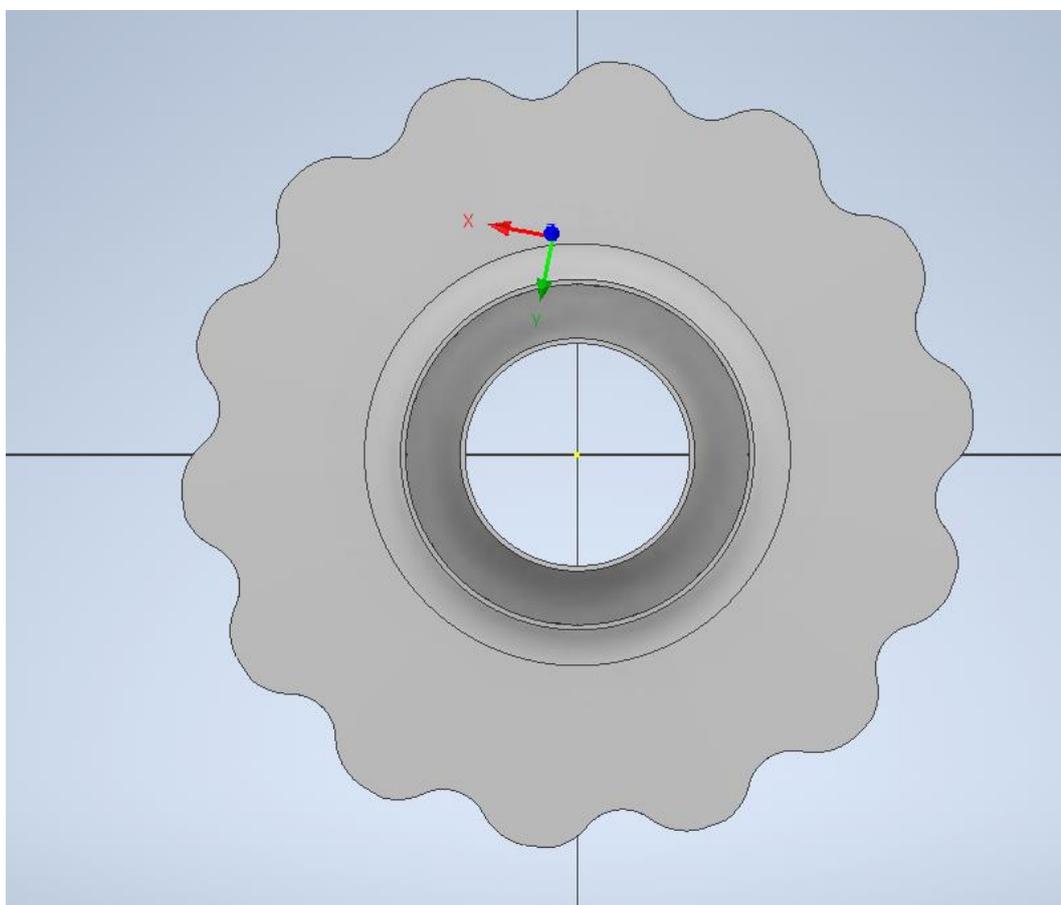


Рисунок 3.9 – Рабочее колесо с вырезами в форме «ромашка»

Для моделирования использованные те же граничные условия и марка стали.

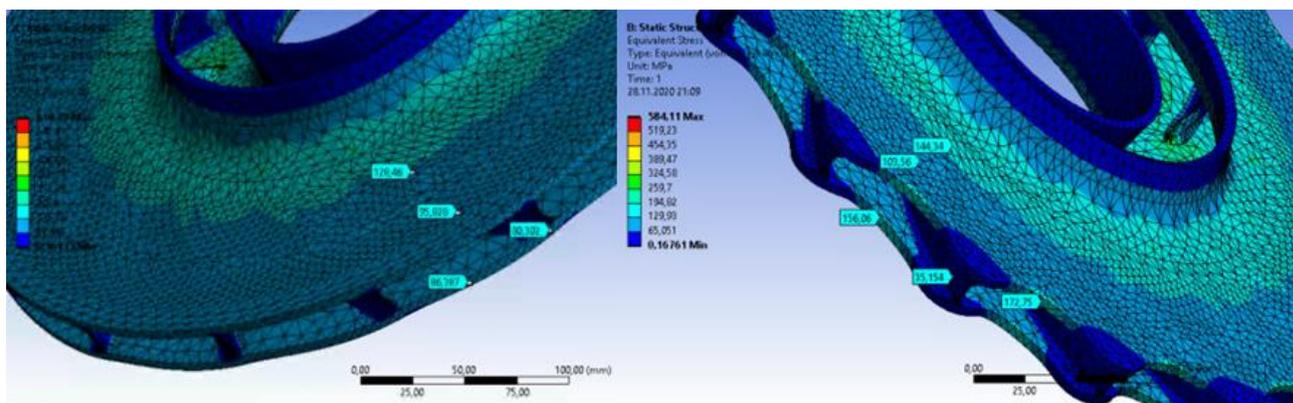


Рисунок 3.10 – Распределение напряжений в периферии РК до и после выреза

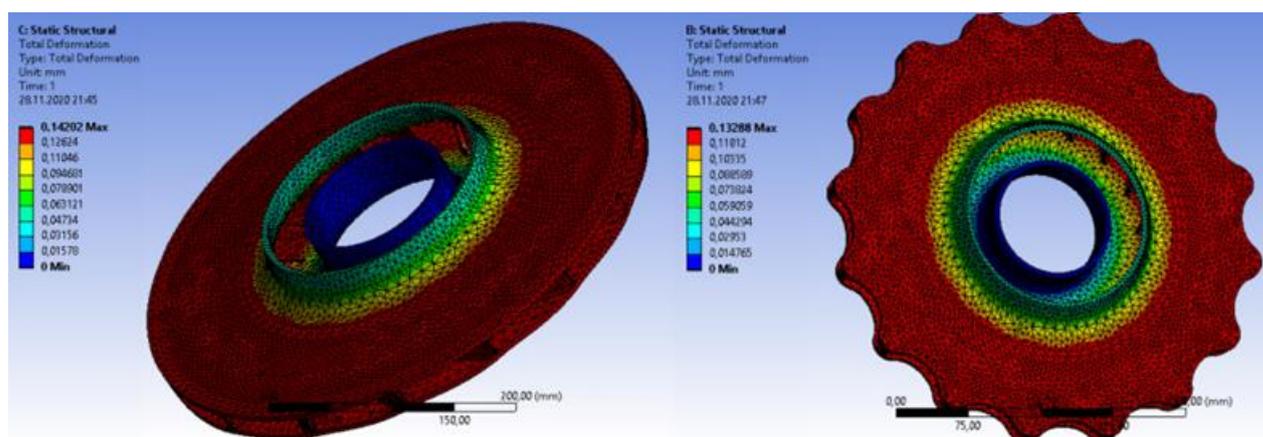


Рисунок 3.11 – Общее перемещение РК под влиянием центробежных нагрузок до и после выреза

После выполнения вырезов РК методом «оромашивания» можно выделить следующие изменения:

- Уменьшение максимального эквивалентного напряжения до 584,11 МПа.
- Уменьшение суммарного перемещения на 6,43% (рис 3.11);
- Значительное увеличение эквивалентного напряжения в периферийной части РК (рис 3.10).

Способ вырезания рабочего колеса при появлении трещин или разломов на периферии покрывного диска показал хорошие результаты. Максимальное эквивалентное напряжение уменьшилось на 4,27%, однако напряжения на периферии колеса увеличилось до двух раз. Исходя из результатов можно сказать, что, использования метода «оромашивания» при выявлении дефектов или вырыве части диска РК применимо в рамках рассмотрения центробежных усилий.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В данной главе будет представлена оценка экономического эффекта от монтажа турбодетандерных установок в газораспределительной станции, которая находится на территории КС и обеспечивает редуцирование и поддержание давления газа для собственных нужд станции.

4.1. Обоснование применения турбодетандерных установок

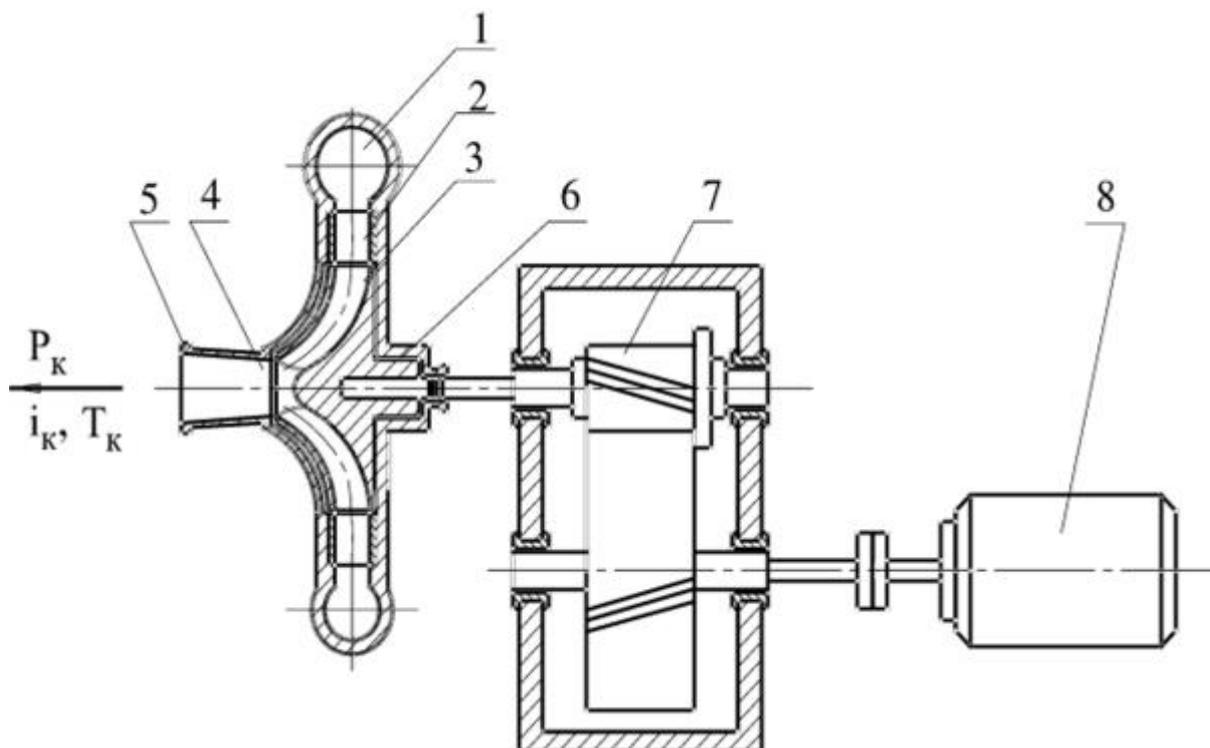
В настоящее время в условиях роста цен и все возрастающего спроса на энергоресурсы особое значение приобретает проблема энергосбережения и использования нетрадиционных источников энергии.

Одно из направлений энергосбережения – это применение детандер-генераторных агрегатов (ДГА) для получения электроэнергии за счет использования технологического перепада давления газа в системах газоснабжения.

Избыточное давление газа как основной компонент вторичных энергоресурсов по технологическим процессам практически не используется на газораспределительных станциях, где применяются дроссельные устройства. Предложение использовать избыточное давление газа в турбодетандерах как на ГРС. Перспектива замены дроссельных устройств турбодетандерными установками будет определяться энергетической и экономической эффективностью.

Турбодетандерами (рис.) называются турбомашин, используемые для расширения газов. Название турбодетандер состоит из двух слов «турбина» – лопаточный двигатель, преобразующий энергию потока рабочей среды в механическую, и «детандер» происходит от французского слова *detendre* – расширять сжатое. Отличие турбины от турбодетандера заключается в том, что основным назначением турбины является выработка механической энергии, а основным назначением турбодетандера – производство холода [3].

					<i>Разработка мероприятий по повышению надежности технологического оборудования компрессорной станции</i>				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					
Разраб..		Винокуров Т.С.			Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение		Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Шадрина А.В.						89	141
Консульт.					<i>НИ ТПУ гр. 2БМ01</i>				
Рук-ль ООП		Шадрина А.В.							



1 – входной патрубок; 2 – направляющий (сопловый) аппарат; 3 – рабочее колесо или вращающаяся решетка; 4 – диффузор; 5 – корпус; 6 – уплотняющие элементы (лабиринтные уплотнения); 7 – редуктор; 8 – генератор для отбора мощности.

Рисунок 4.1 – Схема турбодетандерного агрегата [5]

Стабильность энергоснабжения – один из факторов, определяющих надежность и эффективность работы КС.

Опыт эксплуатации КС показал, что их электроснабжение от централизованных линий электропередач (ЛЭП) приводит к снижению надежности МГ. До 90% отказов на КС с электроприводом газоперекачивающих агрегатов и в системах энергоснабжения собственных нужд связано с получением электроэнергии высоковольтных линий электропередач (ЛЭП). При этом потери в ЛЭП электроэнергии при ее транспорте к удаленным КС достигают 12-14%. Основными потребителями электроэнергии являются аппараты воздушного охлаждения газа, маслоохладители, система вентиляции укрытий, службы электрохимической защиты МГ.

4.2. Разработка проекта внедрения турбодетандерной установки

████████████████████ предназначена для подачи редуцированного газа для системы собственных нужд компрессорной станции и линейно-производственного управления. Основные технические характеристики АГРС представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные технические характеристики АГРС

████████████████████	██████████
████████████████████	██████████
████████████████████	██████████
████████████████████	██████████
████████████████████	██████████
████████████████████	██████████
████████████████████	██████████
████████████████████	██████████
████████████████████	██████████
████████████████████	██████████

Исходя от технических характеристик АГРС, предлагается использование турбодетандерной установки ТДУ-5 ООО «Научно-производственной компании «НТЛ». ТДУ-5, которая поставляется в полной заводской готовности вместе с системой автоматического управления (САУ). САУ работает на базе программируемого контроллера с модулями приема и обработки сигналов, управления и связи в комплекте с выпрямителем, блоком аккумуляторных батарей, инвертором, коммутационным аппаратом с функцией АВР.

Технические характеристики ТДУ-5 представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Основные технические характеристики ТДУ-5

Наименование параметра и характеристики	Значение
Номинальная электрическая мощность на выходе ТДУ, кВт	5
Номинальное напряжение, В	230
Номинальная частота, Гц	50
Рабочая среда привода детандерного двигателя	природный газ по ГОСТ 5542-87 или ОСТ 089-2010
Давление газа на входе ТДУ, МПа	1,5-8,0
Давление газа на выходе ТДУ, МПа	0,3-1,2
Температура газа на входе ТДУ, °С	10-60
Температура газа на выходе ТДУ, °С	0-10
Расход газа при номинальном режиме нагрузки	1600 м ³ /ч

4.3. Оценка экономической эффективности от реализации проекта

Для оценки экономической эффективности инвестиционных проектов производится расчет следующих показателей:

- ЧДД – чистый дисконтированный доход;
- ИД – индекс доходности;
- ВНД – внутренняя норма доходности;
- срок окупаемости при учете фактора времени или дисконтирования

Чистый дисконтированный доход представляет собой текущую стоимость денежных потоков, с учетом требуемой нормы доходности проекта, по сравнению первоначальными инвестициями. На практике ЧДД – это метод оценки отдачи от инвестиций или рентабельности инвестиций для проекта или капитальных расходов. Рассматривая все будущие денежные потоки, которые вы ожидаете от инвестиций, и переводя эти потоки в сегодняшнюю стоимость, вы можете решить, выгоден ли проект.

Индекс рентабельности – удельный показатель, отражает доход в расчете на единицу инвестиций. Чем выше индекс рентабельности, тем удачнее проект; проект отвергается, если индекс доходности меньше единицы.

Внутренняя норма доходности численно равна норме дисконта, при которой сумма дисконтированных притоков денежных средств равна величине дисконтированных оттоков денежных средств за расчетный период, то есть $ЧДД=0$. Показатель характеризует рентабельность проекта с учетом разновременности доходов и расходов, роста цен, выплаты налогов и т.д.

И наконец, срок окупаемости – это период времени, за который первоначальные затраты на реализацию проекта покрываются суммарными результатами (экономией) от его осуществления.

Эффективности внедрения турбодетандерной установки ТДУ-5 определяется, согласно СТО Газпром 2-1.20-601-2011 [33].

					Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		92

Энергосберегающий эффект от внедрения турбодетандерной установки достигается за счет выработки электроэнергии на собственные нужды ГРС и замещения соответствующей величины покупной электроэнергии.

Величину планируемой (фактической) экономии электроэнергии, тыс. кВт·ч, за расчетный период рассчитывают по формуле:

$$\Delta W = 10^{-3} \cdot N_{\text{ТДО}} \cdot k_N \cdot \tau_{\text{ТД}} \quad (4.1)$$

где, $N_{\text{ТДО}}$ – номинальная мощность турбодетандерной установки, кВт;

k_N – коэффициент загрузки по мощности, определяют исходя из условий работы ГРС, примем равным 0,95;

$\tau_{\text{ТД}}$ – планируемое (фактическое) время работы турбодетандерной установки, ч.

Объем сэкономленных денежных средств, затрачиваемых за электроэнергию, определяется по формуле:

$$P_t = \Delta W \cdot s \quad (4.2)$$

где, s – стоимость кВт·ч электроэнергии;

t – время эксплуатации оборудования, год

Экономия электроэнергии при внедрении ТДУ-5 за один год с учетом остановки на регламентные работы и ремонт ($\tau_{\text{ТД}} = 350 \text{ сут} = 8400 \text{ ч.}$)[29,34]:

██

Сумма сэкономленных денежных средств за год при стоимости электроэнергии $s = 4,8 \text{ руб/кВт·ч}$ в регионе, где находится исследуемый объект, составит:

██

Размеры капитальных вложений определяется как сумма затрат на приобретение оборудования, транспортные, монтажные, пуско-наладочные расходы, рассчитываемые в процентах от стоимости приборов и средств автоматизации. Формула определение капитальных вложений будет иметь вид:

$$IC = C_T + T_p + ПН + М \quad (4.3)$$

где, C_T – стоимость приобретаемого оборудования, тыс. руб.;

T_p – транспортные расходы;

ПН – пусконаладочные расходы;

М – расходы на монтажные работы.

Транспортные расходы на доставку оборудования до места установки примем как десятую часть от стоимости самого оборудования. Затраты на пусконаладочные и монтажные работы, примем равными 5% и 8% соответственно. При этих условиях размер капитальных вложений составит:



В годовые затраты можно перечислить расходы, возникающие при техническом обслуживании и ремонте оборудования, и амортизационные отчисления. Оплату сотрудников можно не рассчитывать, т.к. эксплуатация и обслуживание турбодетандерных установок можно производить силами персонала газокompрессорной службы.

Нормативный показатель амортизационных отчислений на полное восстановление определяется в зависимости от срока полезного использования. Норма амортизации определяется по формуле:

$$H_a = \frac{1}{N} \quad (4.4)$$

где N – срок полезного использования оборудования, год.

Срок полезного использования определяется в зависимости от амортизационной группы согласно Постановлению Правительства РФ от 01.01.2002 N 1 (ред. от 27.12.2019) «О Классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы» [17]. Для тех видов основных средств, которые не указаны в амортизационных группах, срок полезного использования устанавливается в соответствии с техническими условиями или рекомендациями изготовителей.

Нормой годовых затрат на ремонт и техническое обслуживание для

турбодетандерных установок примем равным 10 % от первоначальной стоимости оборудования.

Сумма годовых расходов при эксплуатации ТДУ будет рассчитываться формулой:

$$C_t = (H_a + 0,1) \cdot C_T \quad (4.5)$$



Чистый дисконтированный доход определяют по следующей формуле:

$$PV = \sum_{t=0}^T \frac{(P_t - C_t)}{(1 + r)^t} - IC, \quad (4.6)$$

где, r – ставка дисконта.

Ставка дисконтирования по рекомендациям Министерства финансов РФ принимается равной 15%.

Индекс доходности (ИД) следует определять, как отношение суммы дисконтированных эффектов к сумме дисконтированных капитальных вложений:

$$PI = \frac{1}{IC} \sum_{t=0}^T \frac{(P_t - C_t)}{(1 + r)^t} \quad (4.7)$$

Рассчитанные показатели экономической эффективности представлены на табл. 4.3

Таблица 4.3 – Расчётные показатели денежных потоков

[Redacted]	[Redacted]									
	[Redacted]									
[Redacted]	[Redacted]									
[Redacted]	[Redacted]									
[Redacted]										
[Redacted]										
[Redacted]	[Redacted]									

Исходя из расчетных данных построим график (рис.4.2).

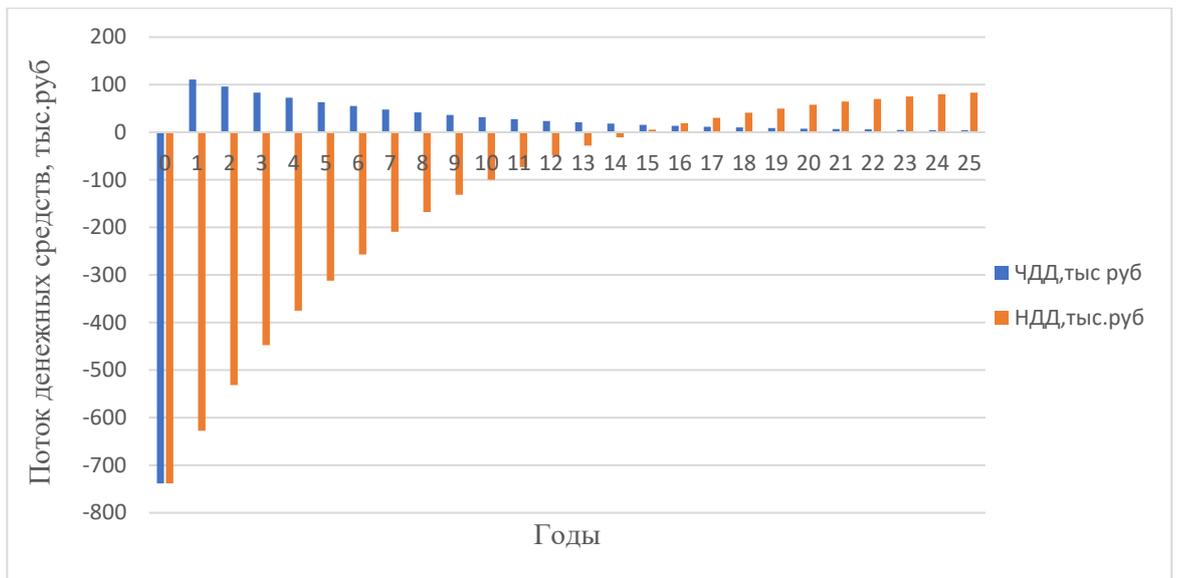


Рисунок 4.2 – Поток денежных средств за срок эксплуатации ТДУ

По результатам расчетов и построенного графика можно определить, что срок окупаемости проекта составит 13 лет.

Определение ВНД и срока окупаемости проводится графическим путем. Для этого построим график зависимости накопленного дисконтированного дохода (НДД) от ставки дисконтирования (рис.4.2).

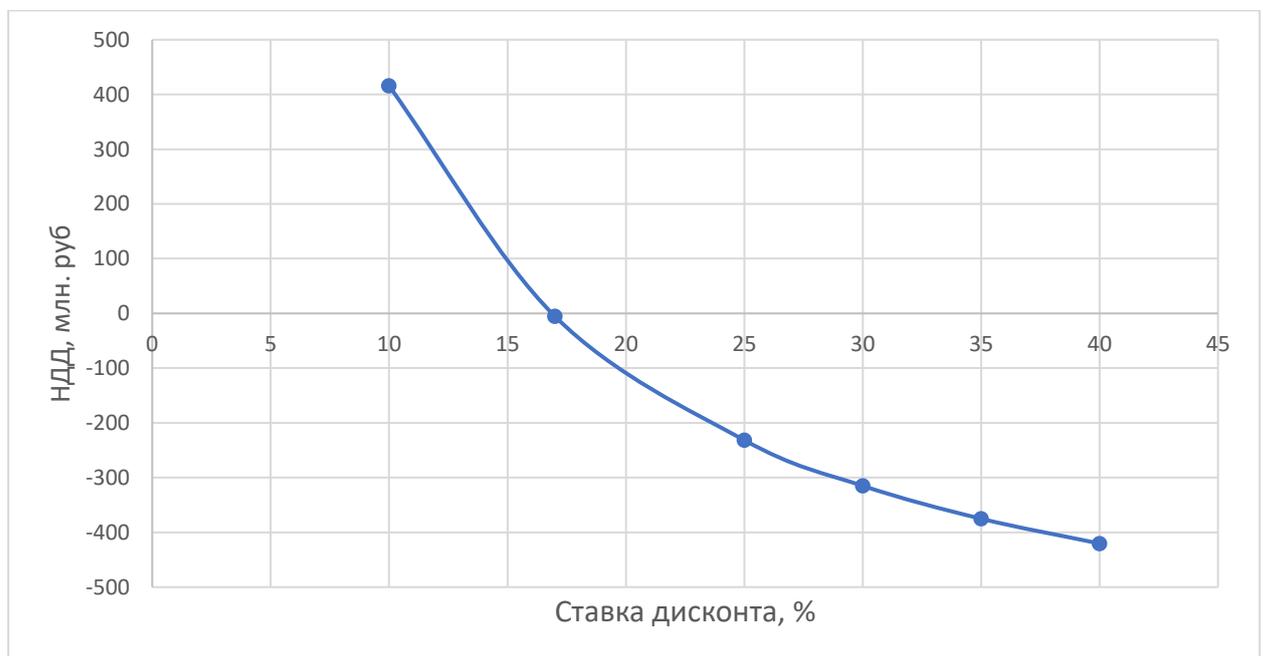


Рисунок 4.3 – График зависимости НДД от ставки дисконтирования

Из графика видно, что внутренняя норма доходности составляет 17,85%. Критерию абсолютной эффективности инвестиционного проекта является

условие $r_{\text{ВНД}} > r$. По данному критерию можно сказать, что проект является экономически эффективным мероприятием.

В данной главе была проведена оценка экономического эффекта проекта по внедрению турбодетандерной установке на ГРС, находящееся на территории КС.

Проект внедрения ТДУ подразумевает собой создание источника электроэнергии, который может быть использован для технологических нужд и/или для собственных нужд станции.

Расчеты экономической эффективности показали, что предлагаемый проект является рентабельным.

					Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		97

5. Социальная ответственность

В данном разделе рассматриваются опасные и вредные факторы, которые могут возникнуть при проведении мероприятий по увеличению эффективности эксплуатации и технического обслуживания компрессорных станций, а также мероприятия с помощью, которых возможно устранить эти факторы. В разделе рассмотрены вопросы, касающиеся производственной безопасности, экологической, безопасности при возникновении чрезвычайных ситуациях, а также правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

При выполнении любых работ в производственных помещениях, внутри аппаратов, сосудов и на других коммуникациях КС от персонала требуется строгое соблюдение правил техники безопасности и организация безопасных условий труда.

5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства.

По степени опасности или вредности условия труда делятся на следующие четыре класса: оптимальные, допустимые, вредные, опасные условия труда.

Условия труда при работе в компрессорном цехе являются допустимыми. Условиями труда, которые являются допустимыми (2 класс) являются те условия, при которых происходит воздействие на рабочего вредного или опасного производственного фактора, уровни воздействия, которых не превышают уровни, установленные в нормативных документах, а измененное функциональное состояние организма человека может восстанавливаться во время регламентированного отдыха или к началу следующего рабочего дня или смены.

В соответствии с законодательством на работах с вредными или опасными условиями труда, а также на работах, связанных с загрязнением,

					<i>Разработка мероприятий по повышению надежности технологического оборудования компрессорной станции</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб..</i>		<i>Винокуров Т.С.</i>			<i>Социальная ответственность</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		<i>Шадрин А.В.</i>					98	141
<i>Консульт.</i>						<i>НИ ТПУ гр. 2БМ01</i>		
<i>Рук-ль ООП</i>		<i>Шадрин А.В.</i>						

работодатель обязан бесплатно обеспечить выдачу сертифицированных СИЗ согласно действующим типовым отраслевым нормам бесплатной выдачи работникам спецодежды, обуви и других СИЗ [18]. Рабочие, занятые на работах с вредными и опасными условиями труда, должны проходить медицинский осмотр в сроки, установлен Минздравом РФ [26]

Все лица, находящиеся на рабочей смене, обязаны носить защитные каски. Работники без защитных касок и других необходимых СИЗ к выполнению работ не допускаются.

Работодатель должен обеспечить работников санитарно-бытовыми помещениями (гардеробными, сушилками для одежды и обуви, душевыми, помещениями для приема пищи, отдыха и обогрева) согласно соответствующим строительным нормам и правилам, и коллективному договору или тарифному соглашению.

В решениях по организации труда излагаются: форма организации труда (вахтовый, экспедиционно-вахтовый, бригадный и т.д.), графики работы, режимы труда и отдыха, составы бригад. При описании режима труда указываются: продолжительность вахты, продолжительность смены, количество смен, часы начала и окончания смены, внутрисменные перерывы на отдых, перерывы на прием пищи.

Запрещается применение труда лиц моложе 18 лет на тяжелых работах и на работах с вредными или опасными условиями труда [19].

Все работники подлежат обязательному государственному социальному страхованию. Работники, а в соответствующих случаях и члены их семей обеспечиваются за счет средств государственного социального страхования: пособиями по временной нетрудоспособности; пособиями по беременности и родам и единовременными пособиями за постановку на учет в медицинских учреждениях в ранние сроки беременности; пособиями при рождении ребенка; пособиями при усыновлении ребенка; пособиями по уходу за ребенком до достижения им возраста полутора лет.

					<i>Социальная ответственность</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		99

5.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Рабочая зона, ее оснащенность и ее оборудование, которые применяются в соответствии с характером выполняемой работы, должны обязательно обеспечивать безопасность рабочего, сохранение его здоровья и поддержание работоспособности всего персонала организации.

Производственные территории, участки работ и рабочие места должны быть обеспечены необходимыми средствами коллективной и индивидуальной защиты работающих, первичными средствами пожаротушения, а также средствами связи, сигнализации и другими техническими средствами обеспечения безопасных условий труда.

В санитарно-бытовых помещениях должна быть аптечка с медикаментами, носилки, фиксирующие шины и другие средства оказания пострадавшим первой медицинской помощи.

В местах проведения огневых работ и на площадках, где установлены сварочные агрегаты, трансформаторы, контрольно-измерительные приборы, должны быть обеспечены меры пожарной безопасности:

- полностью устранена возможность проникновения огнеопасных газов и паров нефтепродуктов к месту производства этих работ;
- на расстоянии 15 м от площадки, на которой выполняют огневые работы, и мест установки сварочных агрегатов территория должна быть очищена от мусора и горючих предметов.

Перед началом огневых работ и в процессе работы периодически замеряется загазованность воздушной среды, наличие и исправность средств индивидуальной защиты.

В период работ по вскрытию и проведению ремонта нагнетателя должна постоянно работать приточно-вытяжная вентиляция. Помимо работы автоматических газоанализаторов, в галерее нагнетателей систематически, но не реже, чем через 30 мин, необходимо производить анализ воздуха у места производства работ с записью в специальном журнале. При содержании газа более 1%,

					<i>Социальная ответственность</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		100

работы прекращаются и принимаются меры по предотвращению проникновения газа.

Проведение инструктажа по технике безопасности и обучение безопасным приемам и методам работы проводит инженер по охране труда (при наличии данной должности) или лицо, исполняющее его обязанности.

5.2. Производственная безопасность

В соответствии с ГОСТ 12.0.003–2015 факторы производственной среды делят на опасные и вредные.

Рассмотрим возможные опасные и вредные факторы в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы			Нормативные доку- менты
	Эксплуата- ция	Диагностика	Ремонт	
1. Превышение уровня шума	+	+	+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопас- ности [23]
2. Недостаточ- ная освещенность рабочей зо- ны	+	+	+	СП 52.13330.2016 Естественное и искус- ственное освещение [32]
3. Превышение уровня виб- рации	+	+	+	ГОСТ 12.1.012-2004 Система стандартов безопасности труда. Вибрационная без- опасность. Общие требования [24]
4. Отклонение показателей микрокли- мата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требо- вания к микроклимату производственных помещений [31]

5. Движущиеся машины и механизмы	+	+	+	ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов по безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация [21]
6. Повышенное значение напряжения	+	+	+	ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ
7. Оборудование и трубопроводы, работающие под давлением	+	+	+	ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ
8. Повышенная загазованность и запыленность рабочей зоны			+	ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ

5.2.1. Анализ вредных производственных факторов

Вредными для организма человека являются повышенная температура, вибрация оборудования и шумы в компрессорных цехах.

Таблица 5.2 – Санитарно-гигиенические условия в производственных помещениях

Параметры	Компрессорный цех	Диспетчерская
Метеорологические условия, категория работ, t, °C	II б средняя тяжесть 13-23	I б легкая 21-23
Относительная влажность, %	15-75	40-60
Скорость движения воздуха, м/с	0,4	не > 0,1
Вентиляция	приточно-вытяжная, общеобменная, аварийная	приточная
Воздушный бал	отрицательный	положительный
Естественное освещение	оконные проемы	оконные проемы
Коэффициент естественного освещения, %	0,2	1,5

Искусственное освещение	ДРЛ во взрывозащитном светильнике	светильники с люминесцентными лампами
Освещенность, лк	50	300
Происхождение шума	компрессоры	КИПиА, телефоны
Уровень шума, дБА	80	65
Происхождение вибрации	компрессоры, трубопроводы	нет

Персонал должен быть обеспечен средствами индивидуальной защиты (СИЗ) в соответствии с типовыми отраслевыми нормами и характером выполняемой работы.

Превышение уровней шума.

В тех случаях, когда уровни шума превышают стандарты по охране здоровья, возникают серьезные проблемы для обслуживающего персонала.

Основным путем борьбы с влиянием шума является применение современных ГПА с эффективной звукоизоляцией, модернизация существующих агрегатов с целью снижения шума, а также строительство звукоотражающих экранов, лесопосадки и т.д.

Производственный шум при работе технологического оборудования на компрессорной станции имеет место повышенный уровень на рабочих местах. Иногда уровень шума достигает 105 дБа и выше, а допустимый уровень шума 85 дБа. поэтому необходимо применять противошумные наушники, которые снижают уровень шума до безопасных пределов. А зоны с уровнем шума, превышающие нормативные, должны быть обозначены предписывающими знаками безопасности. Этот знак означает необходимость работы с применением средств защиты органов слуха, и он вывешивается при входе в рабочее помещение или на участие работ с повышенным уровнем шума.

Недостаточная освещенность рабочей зоны

Для освещения зданий используются искусственные и естественные источники света.

					Социальная ответственность	Лист
						103
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Естественное освещение на главном щите управления создается природными источниками света через оконные проемы, обеспечивающие достаточную освещенность в помещении в светлое время суток. Искусственное освещение осуществляется в помещениях лампами накаливания и люминесцентными лампами. Напряжение питания рабочего освещения во всех основных производственных помещениях осуществляется от двух независимых источников питания, на одном из которых постоянно будет напряжение. Кроме того, в помещениях предусмотрено аварийное освещение от аккумуляторной батареи [31].

Превышение уровня вибрации

Источниками вибраций являются машины и аппараты, в которых движутся неуравновешенные массы. Они характерны для машин роторного типа (турбины, электродвигатели, ручной механизированный инструмент), для механизмов с возвратно-поступательным движением (вибромолоты). Вибрация возникает при соударении деталей в зубчатых зацеплениях, подшипниковых узлах, соединительных муфтах. Источником вибрации, является и движущийся транспорт.

Действие вибраций на человека определяется угнетением центральной нервной системы, вызывая чувство тревоги и страха. Происходят изменения как физиологического, так и функционального состояния организма человека. Это проявляется в повышении утомляемости, увеличении времени двигательной и зрительной реакции, нарушении вестибулярных реакций и координации движений. Наиболее опасной для человека является вибрация с частотой 6-9 Гц [24].

Коллективная виброзащита включает в себя простые и составные средства виброизоляции и виброгашения: установку вибрирующего оборудования на массивный фундамент, применение демпфирующего покрытия и виброизоляторов. СИЗ считаются специальные платформы, сидения, перчатки, рукоятки и некоторые виды обуви, позволяющие минимизировать воздействие вибрации.

					<i>Социальная ответственность</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		104

Отклонение показателей микроклимата на открытом воздухе

Отклонение показателей микроклимата на открытом воздухе возможно при неблагоприятных погодных условиях (слишком низкая/высокая температура воздуха, дождь, снег, сильный ветер и т.п.).

Постоянное отклонение метеоусловий на рабочем месте от нормальных параметров приводит к перегреву или переохлаждению человеческого организма и связанным с ними негативным последствиям:

- при перегреве – к обильному потоотделению, учащению пульса и дыхания, резкой слабости, головокружению, появлению судорог, а в тяжелых случаях
- возникновению теплового удара; – при переохлаждении возникают простудные заболевания, хронические воспаления суставов, мышц и др.

Работающие на открытой территории в зимний период года должны быть обеспечены СИЗ, а именно специальной теплой одеждой, обувью, средствами защиты рук, средствами защиты головы, лица и глаз[31].

Работа должна быть организована таким образом, чтобы рабочие имели возможность периодически находиться в теплом помещении. Работающие на открытой территории в летний период года должны иметь свободный доступ к устройствам питьевого водоснабжения.

Согласно ГОСТ 12.1.005-88 [23] при определенной температуре воздуха и скорости ветра работы приостанавливаются (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Работы на открытом воздухе приостанавливаются работодателями при следующих погодных условиях

Скорость ветра, м/с	Температура воздуха °С
При безветренной погоде:	–40
Не более 5,0	–35
5,1–10,0	–25
10,1–15	–15
15,1–20,0	–5
Более 20,0	0

5.2.2. Анализ опасных производственных факторов

Утечки токсичных и вредных веществ в рабочую зону

Перекачиваемый газ, почти на 98% состоит из метана, в таблице 5.4 приведены его токсичные и пожароопасные свойства.

Таблица 5.4 – Токсичные и пожароопасные свойства газа

Основные параметры газа	Значение
Температура воспламенения, °С	537
ПДК, мг/м ³	300
Пределы воспламенения смеси с воздухом, %	4-16
Санитарная норма, %.	0,8
Токсическое действие	Центральная нервная система

Основные свойства газа:

- при содержании метана в воздухе в пределах от 4 до 16% образуется взрывоопасная концентрация;
- природный газ, скопляющийся в закрытом помещении, вытесняет воздух и удушающее действует на человека;
- предельно допустимое содержание газа в помещениях не должно превышать 1%.

Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования.

Скорость движения автотранспорта, по строительной площадке и вблизи мест производства работ не должны превышать 10 км/час на прямых участках и 5 км/час на поворотах.

Движущиеся части производственного оборудования, являющиеся возможным источником травмоопасности, должны быть ограждены или расположены так, чтобы исключалась возможность прикасания к ним работающего или использованы другие средства (например, двуручное управление), предотвращающие травмирование рабочего персонала.

Также необходимо соблюдать технику безопасности при работе оборудования, машин и механизмов, а их эксплуатацию должны выполнять только лица, имеющие на это право.

Воздействие на гидросферу

Негативным воздействием на гидросферу считается загрязнение сточными водами и мусором.

Природоохранные мероприятия:

1. Соблюдение согласованных мест расположения и границ площадок, расположенных от водоемов и водотоков на нормируемом расстоянии с целью исключения попадания загрязнений в поверхностные воды.

2. Емкости с отработанными ГСМ должны временно храниться на специально отведенной площадке на металлических поддонах, с оборудованным герметичным бордюром, который позволит предотвратить разлив хранящегося количества отходов ГСМ за пределы площадки.

3. Обслуживание, ремонт, заправка техники осуществляется на специально оборудованных площадках.

В случае возникновения нештатной ситуации, связанной с проливом ГСМ, места проливов зачищаются немедленно с помощью песка. Образующийся отход должен храниться в отдельном контейнере.

Воздействие на литосферу.

Негативное воздействие на литосферу - засорение почвы производственными отходами. Природоохранные мероприятия:

1. Приказом по предприятию назначается лицо, ответственное за сбор, временное хранение и организацию своевременного вывоза отходов, образующихся в результате проведения работ.

2. На участке должен проводиться постоянный контроль за состоянием рабочих емкостей и контейнеров с отходами.

3. Места временного хранения и накопления отходов должны соответствовать требованиям техники безопасности, санитарно-гигиеническим нормам и вышеперечисленным инструкциям. Места сбора и накопления отходов должны быть оборудованы углекислотными огнетушителями, ящиками с песком, лопатой, войлоком, кошмой или асбестом [30].

					<i>Социальная ответственность</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		108

5.3.2. Расчет удельных выбросов стравливаемого газа при остановке ГПА

Мощность выброса природного газа M_0 , кг/с, вычисляют по формуле:

$$M_0 = \frac{Q_0 \cdot \rho_{20}}{t} \quad (5.1)$$

где, Q_0 – объём природного газа, выбрасываемого при одной операции остановки ГПА; определяют в зависимости от геометрического объёма источника выделения, коэффициента сжимаемости газа, среднеарифметических значений давления и температуры газа, м³;

ρ_{20} – плотность природного газа при стандартных условиях (20°С и 0,1013 МПа), кг/м³;

t – время стравливания, $t = 239$ сек (0,066ч).

Мощность выброса природного газа, кг/с:

$$M_0 = \frac{1258 \cdot 0,736}{239} = 3,874 \text{ кг/с}$$

Удельные показатели выбросов стравливаемого природного газа при остановке газоперекачивающих агрегатов определяют по мощности выброса как следующие величины удельных выбросов:

– на единицу топливного газа (индекс выброса) $m_0^{\text{ТГ}}$, кг/м³, вычисляют по формуле:

$$m_0^{\text{ТГ}} = \frac{3600 \cdot M_0}{q_{\text{ТГ}}} \quad (5.2)$$

где, $q_{\text{ТГ}}$ – объёмный расход топливного газа, м³ /ч (при 20°С и 0,1013 МПа);

– на единицу работы m_0^N , г/кВт·ч, вычисляют по формуле:

$$m_0^N = \frac{3,6 \cdot M_0}{N_e} \quad (5.3)$$

где, N_e – мощность газотурбинного привода, кВт.

					Социальная ответственность	Лист
						109
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Удельные показатели выбросов сравливаемого природного газа при остановке ГПА по мощности выброса на единицу топливного газа (индекс выброса), кг/м³

$$m_0^{TГ} = \frac{3,6 \cdot 3874,01}{8695} = 1,603 \text{ кг/м}^3$$

Удельные показатели выбросов сравливаемого природного газа при остановке ГПА по мощности выброса на единицу работы, кг/кВт·ч:

$$m_0^N = \frac{3,6 \cdot 3874,01}{3200} = 4,358 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}$$

Удельные показатели выбросов сравливаемого природного газа при остановке газоперекачивающих агрегатов определяют по объёму сравливания на единицу условной номинальной работы как следующие величины удельных выбросов:

– объём выброса природного газа на единицу работы $q_0^{N'}$, м³/кВт·ч, вычисляют по формуле:

$$q_0^{N'} = \frac{Q_0}{N_e \cdot \tau} \quad (5.4)$$

где, τ – календарное время сравливания, ч;

– массовый выброс природного газа на единицу работы $m_0^{N'}$, кг/кВт·ч, вычисляют по формуле:

$$m_0^{N'} = \frac{Q_0 \cdot \rho_{20}}{N_e \cdot \tau} \quad (5.5)$$

Удельные показатели выбросов сравливаемого природного газа при остановке ГПА по объёму сравливания на единицу работы, м³/кВт·ч:

$$q_0^{N'} = \frac{1238}{32 \cdot 2,55} = 15,17 \text{ м}^3/\text{кВт} \cdot \text{ч}$$

Удельные показатели выбросов сравливаемого природного газа при остановке ГПА по массовому выбросу природного газа на единицу работы, кг/кВт·ч:

					Социальная ответственность	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		110

$$m_0^{N'} = \frac{1238 \cdot 0,736}{3200 \cdot 2,55} = 0,112 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}$$

Массовый выброс сравливаемого природного газа при остановке газоперекачивающих агрегатов G_0 , т/год, определяют по формулам:

$$G_0 = M_0 \cdot t \cdot n \cdot 0,036 \quad (5.6)$$

$$G_0 = \frac{Q_0 \cdot \rho \cdot n}{1000} \quad (5.7)$$

где, n – количество технологических операций в год;

0,036 – коэффициент пересчёта.

Массовый выброс сравливаемого природного газа при остановке газоперекачивающих агрегатов, т/год:

$$G_0 = \frac{1258 \cdot 0,736 \cdot 20}{1000} = 18,52 \text{ т/год}$$

Валовый выброс сравливаемого природного газа при остановке газоперекачивающих агрегатов за отчётный или планируемый период эксплуатации G'_0 , т/период, определяют с учётом удельных выбросов по основному технологическому показателю (расход топливного газа) по формуле:

$$G_0 = \frac{Q_0 \cdot \rho \cdot n}{1000} \quad (5.8)$$

где, $q'_{\text{тг}}$ – объёмный расход топливного газа за отчётный или планируемый период эксплуатации агрегата, м³/период

$$G'_0 = 1,603 \cdot 16963320 \cdot 10^{-6} = 27,19 \text{ т/период}$$

5.4.Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – внешне неожиданная, внезапно возникающая обстановка, которая характеризуется резким изменением установившегося процесса, оказывающая значительное отрицательное влияние на жизнедеятельность людей и окружающую среду.

Анализ возможных ЧС.

					<i>Социальная ответственность</i>	Лист
						111
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Чрезвычайные ситуации могут возникнуть в процессе ремонтных работ на КС:

- экологическое загрязнение окружающей среды (утечки газа);
- возгорание ГСМ;
- попадание молнии в оборудование КС;
- техногенные причины (аварии);
- пожар на объекте.

Аварии на КС могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций. Основными причинами возникновения аварий являются: коррозионные разрушения, перепады температур, неверное техническое обслуживание, отказ приборов контроля и сигнализации, факторы внешнего воздействия (молнии, ураганы и прочее).

Для предупреждения попадания молний в оборудование КС необходимо устанавливать молниеотводы, корпус оборудования КС должен быть заземлён. По периметру необходимо устанавливать заземлители через каждые 50 м. Также заземляют все коммуникации, находящиеся на объекте.

Для предотвращения возгорания ГСМ следует хранить в изолированных помещениях для хранения топлива. Место заправки от места выполнения огневых работ и открытых источников огня должно быть расположено не ближе 20 м.

Наиболее вероятная ЧС

Наиболее характерной ЧС является пожар на компрессорной станции.

Пожары на газотранспортных объектах развиваются по следующей схеме: авария, утечка газа, образование облака взрывоопасной смеси, воспламенение ее от источника зажигания, горение газа, нагревание и разрушение технологического оборудования под воздействием пламени.

При авариях в помещениях взрывоопасные концентрации газа возникают в первую очередь вблизи места утечки газа, а затем распространяются по всему

					<i>Социальная ответственность</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		112

помещению. На открытых площадках вблизи места утечки образуется зона загазованности, распространяющаяся по территории объекта. Величина ее при аварийном истечении газа зависит от многих факторов, главные из которых – расход газа, форма и направление его струи, метеорологические условия, рельеф местности. Наибольшее влияние на величину зоны загазованности оказывает ветер.

Разработка мер по предупреждению ЧС.

Для того чтобы предотвратить ЧС, связанных с возникновением взрывов или пожаров необходимо применять следующие меры безопасности:

– необходимо переносным газоанализатором проверить уровень загазованности воздушной среды, важно, чтобы содержание газов не превышало ПДК по санитарным нормам;

– проведение работ разрешается в том случае, когда устранены после устранения опасные условия, в ходе работ необходимо периодически осуществлять контроль загазованность воздушной среды;

Распределение по категориям взрыво- и пожароопасности основных зданий и помещений компрессорной станции приведено в табл. 5.6.

На КС должны иметься схемы пожарного водопровода с указанием мест установки пожарных гидрантов и кранов.

Таблица 5.6 – Категории взрыва и пожароопасности основных зданий и помещений КС

Здания и сооружения	Категория пожароопасности (НПБ 105-2003)	Класс взрываемости (ПУЭ)
отсек двигателей электропривода	<i>Г</i>	-
отсек центробежных нагнетателей	<i>А</i>	В-Іа
помещения хранения, регенерации и раздачи смазочных масел	<i>В</i>	П-І
аккумуляторная	<i>А</i>	В-Іа
котельная на газовом топливе	<i>Г</i>	-
химическая лаборатория	<i>В</i>	П-І

План действий в случае ЧС

Рабочий в случае обнаружения очага возгорания или возможных признаков самого горения, а именно: задымленность, запах гари, повышение температуры должен:

- мгновенно сообщить о данном происшествии в службу пожарной охраны, рабочий должен назвать наименование объекта, место пожара или взрыва, а также свою фамилию;
- необходимо принять меры по эвакуации людей, тушению пожара и сохранению материальных ценностей.

В данном разделе были рассмотрены были рассмотрены и проанализированы воздействия предложенных мероприятий с точки зрения экологической, производственной опасности. Были описаны методы по предотвращению чрезвычайных ситуаций. А также были рассмотрены вопросы обеспечения безопасности во время работы на компрессорной станции.

					<i>Социальная ответственность</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		114

Заключение

По результатам работы было выяснено снижение показателей надежности современного парка оборудования ЕСГ, что, следовательно, приводят большому числу отказов.

В ходе работы были различные применены различные методологии оценки вероятности безотказной работы технологического оборудования в газонефтепроводах и, в частности, КС. Методы структурных схем и статистического анализа можно применять для оценки надежности как относительно новых объектов, так и давно эксплуатируемых объектов.

Проведя оценку надежности технологического оборудования КС, были предложены следующие мероприятия:

– Применять однотипные ГПА при перспективном строительстве второго компрессорного цеха, это позволит упростить обслуживание оборудования, а также позволит повысить вероятность безотказной работы всего цеха;

– Построить резервную азотную станцию, что позволит обеспечить работу КС при отказе единственной азотной станции, т.к. отказ ее приведет к неработоспособному состоянию всех ГПА.

Еще одним рассмотренным перспективным мероприятием по повышению надежности технологического оборудования КС является применение композитных при конструировании РК ЦБН. По результатам оценки НДС, композитные материалы показали больший запас, чем его аналоги.

Кроме того, был предложен проект по использованию турбодетандерных установок, который может быть применен как резервный источник электроэнергии или же использован для компенсации больших энергозатрат.

В данной работе была продемонстрирована эффективность от всех вышеописанных методов оценки надежности и технологий, способных обеспечивать

					<i>Разработка мероприятий по повышению надежности технологического оборудования компрессорной станции</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб..</i>	<i>Винокуров Т.С.</i>				<i>Заключение</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>	<i>Шадрин А.В.</i>						115	141
<i>Консульт.</i>						<i>НИ ТПУ гр. 2БМ01</i>		
<i>Рук-ль ООП</i>	<i>Шадрин А.В.</i>							

ее. Данные современные мероприятия по повышению надежности могут быть использованы на КС с различными характеристиками, природно-климатическими условиями и т.д.

					<i>Заключение</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>116</i>

Список использованных источников

1. Газоперекачивающие агрегаты и обслуживание компрессорных станций / А.П. Мороз, И.И. Мальцуров, К.Г. Арустамов, В.И. Короткое и др. — М.: Недра, 1979. — 229 с.
2. Дейнеко, С.В. Обеспечение технологической и конструктивной надежности систем трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа/ С.В. Дейнеко.– М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2019. – 248 с.
3. Епифанова, В.И. Компрессорные и расширительные турбомашинны радиального типа / В.И. Епифанова. – М.: МВТУ им. Н. Баумана, 1998. – 376 с.
4. Богатыров, В.А. Информационные системы и технологии. Теория надежности: учеб.пособие для бакалавриата и магистратуры / В.А. Богатыров. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 318с.
5. Карагусов В.И. Низкотемпературные машины: учебное пособие / Карагусов В.И.. — Омск: Омский государственный технический университет, 2016. — 232 с.
6. Бармин, С.Ф. Компрессорные станции с газотурбинным приводом/ Бармин С. Ф., Васильев П. Д., Магазаник Я. М. – Л.,Недра, 1968. 280 с
7. Кунина, П.С. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с центробежными нагнетателями/ Кунина, П.С, Павленко П.П – Ростов-на-Дону, изд-во РГУ, 2001. - 362 с.
8. Матвеевский, В.Р. Надежность технических систем. Учебное пособие/ Матвеевский В.Р. – Московский государственный институт электроники и математики. М., 2002 г. – 113 с
9. Микаэлян, Э.А. Эксплуатация газотурбинных газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций газопроводов/ Микаэлян Э.А. – М.: Недра, 1994. - 304с.
- 10.Мониторинг силовых агрегатов на компрессорных станциях / Е.О. Антонова, И.А. Иванов, О.А. Степанов, М.Н. Чекардовский - СПб.: ОАО Издательство “Недра”, 1998. - 216 с
- 11.Проектирование центробежного компрессора с применением технологии оптимизации IOSO: электрон.учеб. пособие / О. В. Батурин, Д. А. Колмакова, В. Н. Матвеев, Г. М. Попов; М-во образования и науки РФ, Самар.гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). –

					<i>Разработка мероприятий по повышению надежности технологического оборудования компрессорной станции</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Винокуров Т.С.</i>			<i>Список использованных источников</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		<i>Шадрина А.В.</i>					117	141
<i>Консульт.</i>						<i>НИ ТПУ гр. 2БМ01</i>		
<i>Рук-ль ООП</i>		<i>Шадрина А.В.</i>						

- Электрон.текстовые и граф. дан. (2,4- Мбайт). - Самара, 2013. – 1 эл. опт.диск (CD-ROM).
- 12.Руководство по добыче, транспорту и переработке природного газа, пер. с англ., [М], 1965; Транспорт природного газа, [Сб. ст.], М., 1967; Бармин С. Ф., Васильев П. Д., Магазаник Я. М., Компрессорные станции с газотурбинным приводом, Л., 1968.
 - 13.Седых З.С. Эксплуатация газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом/ Седых З.С. – М.: Недра. 1990. - 203 с
 - 14.Федотов, А. В. Основы теории надежности и технической диагностики: конспект лекций / А. В. Федотов, Н. Г. Скабкин. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. – 64 с.
 - 15.Червонный А.А. Надёжность сложных систем/ Червонный А.А., Лукьяненко В.И., Котин Л.В – М.: Машиностроение. 1976. -288с.
 - 16.Постановление Минтруда РФ от 24 октября 2002 г. N 73 (ред. от 14.11.2016) "Об утверждении форм документов, необходимых для расследования и учета несчастных случаев на производстве, и Положения об особенностях расследования несчастных случаев на производстве в отдельных отраслях и организациях"
 - 17.Постановление Правительства РФ от 01.01.2002 №1 (ред. от 27.12.2019) «О Классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы».
 - 18.Приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 1 июня 2009 г. N 290н (ред. от 27.01.2010) "Об утверждении Межотраслевых правил обеспечения работников специальной одеждой, специальной обувью и другими средствами индивидуальной защиты".
 - 19.Федеральный закон "О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с принятием Федерального закона "О специальной оценке условий труда" от 28.12.2013 N 421-ФЗ
 - 20.Федеральным законом "Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний"
 - 21.ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
 - 22.ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности
 - 23.ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1).
 - 24.ГОСТ 12.1.012-2004 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования

					<i>Список использованных источников</i>	<i>Лист</i>
						118
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

- 25.ГОСТ 12.1.046-2014 ССБТ. Строительство. Нормы освещения строительных площадок.
- 26.ГОСТ Р 12.4.296-2013 ССБТ. Одежда специальная для защиты от вредных биологических факторов (насекомых и паукообразных). Общие технические требования. Методы испытаний
- 27.ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Термины и определения
- 28.ГОСТ Р 55989-2014 Магистральные газопроводы. Нормы проектирования на давление свыше 10 МПа. Основные требования
- 29.РД 153-39.4-113-01 Нормы технологического проектирования магистральных нефтепроводов
- 30.РД 51-100-85. Руководство по нормированию выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на объектах транспорта и хранения газа.
- 31.СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
- 32.СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение.
- 33.СТО Газпром 2-1.20-601-2011 «Методика расчета эффекта энергосбережения топливно-энергетических ресурсов, расходуемых на собственные технологические нужды магистрального транспорта газа»
- 34.СТО Газпром 2-3.5-051-2006 Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов
- 35.Патент № 2611521 Российская Федерация, МПК В29С 39/00, В29С 33/52. Рабочее колесо компрессора, выполненное из композитного материала, с эрозионностойким покрытием (варианты) и способ его изготовления : № 2013154031 : заявл. 20.06.2012 : опубл. 27.02.2017 / Л. Джованнетти, А. Массини ; заявитель Нуово Пиньоне С.п.А.
- 36.Патент № 2652269 С2 Российская Федерация, МПК F04D 29/00. Способ изготовления рабочего колеса центробежного компрессора из композиционного материала : № 2016107247 : заявл. 29.02.2016 : опубл. 25.04.2018 / С. Н. Никитин, А. М. Ахметов, В. Л. Юрьев [и др.] ; заявитель Акционерное общество "Институт технологии и организации производства" (АО НИИТ).
- 37.Крюков Олег Викторович. «Энергоэффективные электроприводы газоперекачивающих агрегатов газопроводов на базе интеллектуальных систем управления и мониторинга»: диссертация ... доктора технических наук: 05.09.03 / Крюков Олег Викторович;[Место защиты: Открытое акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и

					Список использованных источников	Лист
						119
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна»(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)],.- Москва, 2015.- 312 с.
- 38.Борисов Д. И. Анализ аварийных остановок на компрессорных станциях Томской области / Д. И. Борисов, Р. С. Быков ; науч. рук. Н. В. Чухарева // Творчество юных - шаг в успешное будущее : материалы VIII Всероссийской научной студенческой конференции с элементами научной школы имени профессора М. К. Коровина, г. Томск, 23-27 ноября 2015 г. — Томск : Изд-во ТПУ, 2015. — С. 382-385
- 39.Борисов, Д. И. Анализ факторов аварийности на компрессорных станциях Томской области / Д. И. Борисов, Р. С. Быков // Наука и молодёжь в XXI веке : Материалы Всероссийской студенческой научной конференции, Омск, 01 декабря 2015 года / Ю. А. Краус, ответственный редактор. – Омск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет", 2015. – С. 126-131.
- 40.Дейнеко С.В. Методология анализа и оценки надежности систем трубопроводов с использованием структурных моделей. – Надежность, 2009, №2, с.41-48.
- 41.Жернаков, В. С. Влияние технологических отклонений структуры композитной лопатки центробежного компрессора на ее напряженно-деформированное состояние // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 1 (79). – С. 10-19
- 42.Жернаков, В. С. Расчет напряженно-деформированного состояния центробежного колеса компрессора из титанового сплава / В. С. Жернаков, И. Н. Будилов, А. Н. Ермоленко // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2015. – Т. 19. – № 3(69). – С. 97-102.
- 43.Жернаков, В. С., ПервушинЮ.С., Соловьев С.В. Влияние структуры композитной лопатки компрессора центробежного типа на ее напряженно-деформированное состояние // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 3(77). – С. 19-25.
- 44.Лабуоть, Е. В. Анализ взаимосвязи объемов технического обслуживания и количества аварийных остановок компрессорных станций / Е. В. Лабуоть, А. Г. Кульбей, В. К. Липский // Булатовские чтения. – 2020. – Т. 4. – С. 89-96.

					Список использованных источников	Лист
						120
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

45. Исследование методов обеспечения работоспособности газотранспортной системы ПАО "Газпром" / И. Р. Байков, Н. М. Дарсалия, С. В. Китаев [и др.] // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – № 2(112). – С. 67-77.
46. Методические принципы параметрической диагностики технического состояния газотурбинных газоперекачивающих агрегатов / А. В. Семушкин, А. О. Подлозный, Е. А. Черникова, В. А. Щуровский // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2017. – № 1(29). – С. 22-31.
47. Павлов, В. П. Прочность лопатки компрессора авиационного двигателя при замене титанового сплава на композиционный материал / В. П. Павлов, Э. М. Нусратуллин, А. А. Филиппов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2011. – Т. 15. – № 4(44). – С. 98-106.
48. Сальников, С. Ю. Оценка и планирование показателей технического обслуживания и ремонта газоперекачивающей техники на основе критериев эксплуатационной готовности / С. Ю. Сальников, А. В. Семушкин, В. А. Щуровский // Газовая промышленность. – 2018. – № S3(773). – С. 50-55.
49. Харионовский, В. В. Газотранспортная система: исследования конструкций и технического состояния магистральных газопроводов / В. В. Харионовский // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2020. – № 2(44). – С. 162-174.
50. Щуровский, В. А. Анализ методических подходов к обеспечению работоспособности компрессорного парка / В. А. Щуровский // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2017. – № 1(29). – С. 13-21.
51. Martynyuk, L., D. V. Afanasiev, L. V. Bykov, A. D. Ezhov and M A Mezintsev. "The study of the applicability of polymer composite materials for the manufacture of the impeller of a centrifugal compressor." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1060 (2021): n. pag.
52. reza kashyzadeh, Kazem & Alipanah Kivi, Sara & Rynkovskaya, Marina. (2017). Fatigue Life Assessment of Unidirectional Fibrous Composite Centrifugal Compressor Impeller Blades Based on FEA.
53. Vilag, Jeni. (2014). Dynamic Balancing Method for a Carbon Fibre Centrifugal Compressor Impeller.
54. Интенсивность отказов: свободная энциклопедия Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%81%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%BE%D1%82%D0%BA%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2 (дата обращения: 25.04.2022)

					Список использованных источников	Лист
						121
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

55. Оперативный доклад об исполнении федерального бюджета и бюджетов государственных внебюджетных фондов январь – сентябрь 2021 года: сайт Росстата. URL: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/3b4/nvkjn8fio1ytqehomei9od0qa4yhcxk0.pdf> (дата обращения: 29.05.2022)
56. Справочник «Газпром в цифрах 2016–2020» <https://www.gazprom.ru/f/posts/05/118974/gazprom-in-figures-2016-2020-ru.pdf> (дата обращения 03.05.2022)
57. Сфера деятельности ПАО «Газпром» (Основные активы и проекты Группы «Газпром» в транспортировке и подземном хранении газа): сайт ПАО «Газпром» URL: <https://ugs.gazprom.ru/about/working/> (дата обращения: 03.05.2022)
58. Единая система газоснабжения России: сайт ПАО «Газпром» URL: <https://www.gazprom.ru/about/production/transportation/> (дата обращения: 03.05.2022)

					<i>Список использованных источников</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		122

Приложения

Приложение А (справочное)

Literature Review Increasing the Reliability of a Centrifugal Compressor by Using a Composite Impeller

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ01	Винокуров Тимофей Сергеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Шадрина Анастасия Викторовна	д.т.н, доцент		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Айкина Татьяна Юрьевна	к.ф.н., доцент		

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
					<i>Разработка мероприятий по повышению надежности технологического оборудования компрессорной станции</i>		
Разраб..		Винокуров Т.С.					
Руковод.		Шадрина А.В.			Лит.	Лист	Листов
Консульт.						123	141
Рук-ль ООП		Шадрина А.В.			<i>Приложения</i>		
					<i>НИ ТПУ гр. 2БМ01</i>		

1. Assessment of the stress-strain state of centrifugal compressors made of traditional and composite materials

Centrifugal compressors play an important role in gas transportation. Therefore, the reliability and durability of the compressor is of great importance. Also, in addition, it is important to note that modern technologies should be more energy efficient in accordance with the requirements of the energy saving policy.

Currently, one of the promising areas is the use of composite materials in various industries including in the oil and gas industry when designing impellers of centrifugal compressors.

In this part of the work, a literature review from various sources (domestic and foreign) will be carried out. Our objective is to determine:

- existing experience in the use of composite materials;
- technologies used in the production of centrifugal compressors made of composite materials;
- restrictions on the use of composite materials.

In addition, it is necessary to study what research methods are used to determine the efficient and reliable operation of centrifugal compressors.

The first article under consideration is titled “The study of the applicability of polymer composite materials for the manufacture of the impeller of a centrifugal compressor” [1]. The work was presented by the researchers from the Central Institute of Aviation Motors and the Moscow Aviation Institute in the journal “Advanced Materials & Demanding Applications” in 2021. The aim of the study was to improve the method for determining the thermal effect on the impeller of a centrifugal compressor using modern research methods such as the finite element method.

The paper states that the use of composite materials is one of the promising areas. However, despite several advantages, there are several restrictions on their use. One such limitation is the decomposition temperature of the binder. In the research, a binder PN-3M was used, the permissible temperature of which is 450 C. For the

					<i>Приложения</i>	<i>Лист</i>
						124
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

calculation, a low-flow compressor was taken, the compressor operation was modeled on it and the conditions were determined under which the temperature of the structure did not exceed the temperature of the binder destruction.

To obtain the results, a three-dimensional model of a centrifugal compressor impeller was made. Using Ansys Mechanical, the model was meshed, and the thermal state of the model was simulated. According to the results, it was revealed that the rear surface is heated to temperatures close to the fracture temperature of the composite material bond, but not exceeding it.

It was also determined that it is possible to create an impeller based on reinforcing fibers UMT-49S and binder PN-3M. The use of this material will reduce the impeller weight by 45% compared to the aluminum prototype.

The paper confirms the possibility, as well as the prospect, of using composite materials in the design of a compressor impeller. It also highlights some of the disadvantages of such designs, such as degradation of the bonding parts of composite materials. For this reason, it is necessary to further study this issue and search for analog materials with higher thermal stability.

The second paper is titled “Fatigue Life Assessment of Unidirectional Fibrous Composite Centrifugal Compressor Impeller Blades Based on FEA”. The authors of this article are: Kazem Reza Kashyzadeh from the Department of Mechanical Engineering, International Campus of Sharif Technological University; Sara Alipanah Kivi from the Department of Mechanical Engineering, University of Tehran; Marina Rynkovskaya from the Department of Strength of Materials and Structures, Peoples’ Friendship University of Russia. The work was published on May 5, 2017 in the International Journal of Emerging Technologies and Advanced Engineering.

The article is a comparative analysis of the stress-strain state of a centrifugal compressor impeller, consisting of steel and an impeller made of a composite material. For the study, it was decided to use the finite element method. Two different materials were taken as a basis:

- 1) an alloy with a nickel content of 67%;

					<i>Приложения</i>	<i>Лист</i>
						125
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

2) a composite material consisting of As-4 carbon fiber from Hexcel Inc. and SC-15 epoxy from Poleramic Inc.

In operation, the compressor impeller is affected by various stresses such as residual stress during machining, installation stress, thermal stress, centrifugal stress, and operating flow stress. In the article under consideration, centrifugal loads have been considered. Boundary conditions with a constant angular velocity of 4789 radians per second were used to simulate centrifugal stresses.

Based on the results of this study, it was determined that on an impeller consisting of a nickel alloy, the maximum von Mises stress falls on the upper part of the blades, as well as at the junction of the blades and the wheel housing and is 846 MPa. And on a composite impeller, the maximum stress value is 80.40% lower than that of a nickel alloy wheel. Thus, the fatigue life of the composite impeller is much greater than the fatigue life of the alloy impeller and amounts to 4.23×10^{11} cycles.

Based on these results, it can be concluded that the use of composite epoxy-carbon material increases the reliability of the centrifugal compressor impeller. Based on the results presented in the abovementioned article, the mass of the structure has decreased, which led to a decrease in loads. However, in the work under discussion, the stress-strain state of the impeller was considered only under centrifugal loads. It is not clear how the impeller will behave when exposed to other loads.

Next work [3] is presented by a group of researchers, which included: B. S. Zhernakov, I. N. Budilov, A. N. Ermolenko. Vladimir Sergeevich Zhernakov is a Doctor of Technical Sciences in heat engine, head of the Department of Strength of Materials at Ufa State Aviation Technical University (USATU). Vladimir Sergeevich is the author of many works. One of his research areas is the study of creating and using composite materials in the design of compressors. This work can be considered the beginning of his research. Two other researchers are colleagues of Zhernakov: Budilov Igor Nikolaevich is a professor of the Department of Strength of Materials of USATU, and Eromolenko Anatoly Nikolvaevich is a senior teacher of the Department of Strength of Materials in USATU. The topic of the research was the

					<i>Приложения</i>	<i>Лист</i>
						126
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

calculation of the stress-strain state (SSS) of a centrifugal compressor wheel made of titanium alloy. The authors argue that the improvement of modern turboshaft engines of auxiliary power plants is impossible without assessing the stress-strain state of their units. Therefore, it is proposed to perform the stress-strain state of the impeller of a centrifugal compressor to identify hazardous areas. To calculate the SSS, the finite element method was used on the Ansys Workbench software package.

To conduct the study, the authors built a CAD model of the working fluid of the compressor (Fig. 1). The model was a monolithic body, consisting of a disk, a shaft and working blades, large and small, in the amount of 36 pieces.

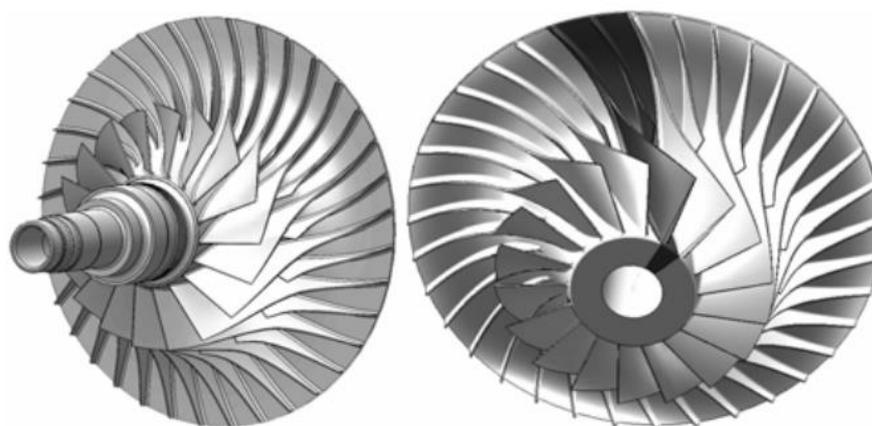


Figure 1 - CAD model of a centrifugal compressor

It was necessary to determine how various physical processes affect SSS, such as operating pressure, temperature and centrifugal loads. According to the results of the study, the following results were obtained: increasing stresses prevail on the edge of a large blade, and there are also zones where compressive stresses are more pronounced. Along the edge of the small blade, only tensile stresses are observed, which decrease with decreasing radius. The bending nature of the deformation of the blades is clearly visible, while at their base, on the one hand, tensile stresses predominate, and on the opposite side, compressive stresses. The data obtained indicate that the direction of the principal stresses is largely determined by the action of centrifugal loads. In the region of the hub, the direction of the main stresses is almost radial.

In the disk part of the wheel, the direction of the principal stresses is close to axial. At the edges of the blades, the orientation of the principal stresses practically coincides with the direction of the normal to the edge.

From the foregoing, it was concluded that under the influence of various loads that occur during the operation of a centrifugal compressor in the working disk, axial displacements predominate, caused by bending deformation of the disk base and blade feather. It has been established that under the action of operational loads, the stresses in the blades at the base of the centrifugal compressor are 3.5 times higher than the stresses in the input part of the disk. The influence of the temperature field on the stress-strain state of the CS is expressed in the form of tensile stresses localized in the region of the hub. When modeling the combined effect of a centrifugal load, temperature field and working pressure, it was found that the direction of the maximum principal stresses in the blades of a centrifugal compressor significantly depends on the action of centrifugal loads and practically coincides with the direction of the normal to the blade. The maximum equivalent stresses occur on the surface of the main blade near the hub. The results obtained confirm the importance of further research and design of a centrifugal compressor wheel made of modern promising materials, including composite materials, taking into account the nature of stress distribution in it.

2. Dependence of the reliability of the composite on the layers stacking structure

The next work on this topic was presented in 2017 in the journal “Vestnik USATU”. The authors are also V.S. Zhernakov, with his colleagues Yu.S. Pervushin, P.V. Soloviev. The work is titled “Influence of the structure of a composite centrifugal compressor blade on its stress-strain state” [4].

The article defines the dependence of the physical and mechanical properties of a composite material, such as: elastic, strength, thermal and other characteristics, on the structure of its layers.

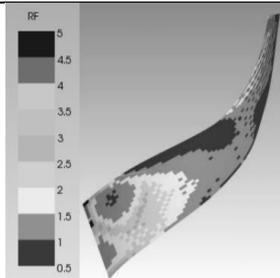
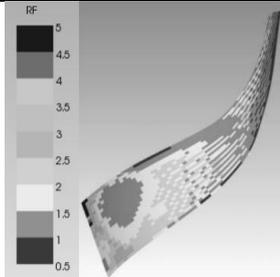
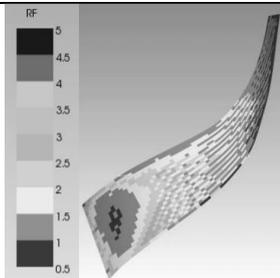
When designing products made of composites, the following structures are usually used (Fig. 2).

					<i>Приложения</i>	<i>Лист</i>
						128
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

significant shear stresses act in the transition zone of the blade, which can cause the destruction of the interface between the binder and the reinforcing material. To ensure the shear stress strength, it is necessary either to change the structure of the blade to reduce the shear stresses in the layers (introduction of layers laid at an angle of 45° or close to it), to use a binder with a higher shear strength, or to increase the shear strength of a unidirectional layer by using 3D reinforcement.

In addition, the results of the data obtained were built in table 1, which shows the results of calculating the stress-strain state and the safety factor for various composite structures.

Table 1 – Results of SSS and Safety Factor Calculations for Various Composite Structures

The structure of the layers of the blade	Minimum safety factor	Safety factor distribution pattern
$(0/90)_n$	0.7	
$(0/90/45)_n$	0.75	
$(90/45)_n$	0.72	

When designing blades made of multilayer composite materials, a balanced structure must be observed. Balanced means the structure of a layered composite that meets the following requirements:

- symmetry of the layers relative to the middle surface of the layered package;
- each layer with a laying angle of $+\varphi$ must correspond to a layer with a $-\varphi$ angle located at the same distance from the middle surface.

The authors analyze the effect of deviations in the structure of the composite structure. For this, the method of laying layers at angles of 0° and 90° was taken as a basis. Since it is believed that a balanced structure of the layers of the composite material can only be ensured by unidirectional laying of the layers of the composite material or by laying the layers at angles of 0° and 90° . When you try to change the laying angle of the layers, the symmetry requirements are not met, which, as a result, excludes the satisfaction of the reverse stacking condition ($\pm\varphi$).

The article also indicates the need to take into account deformations that may arise due to the deviation of the stacking structure from the given one. The consequences of such deformations can lead to:

- decrease in the aerodynamic characteristics of the blade;
- change in the stress-strain state of the blades;
- compressor efficiency reduction.

To determine the effect on the SSS of a composite blade from its structure, it was proposed to carry out a calculation in which it was necessary to determine the SSS of a composite blade at normal temperature (20°C) and at high (285°C) to determine how high temperature will affect the composite materials. Based on the calculation results, it was determined that the minimum safety factor at normal and high temperatures is 1.7 and 1.42, respectively.

Further, the analysis of the effect of imbalance was carried out. First, we analyzed the effect of imbalance caused by deviations in the angle of the outer layer of the blade. We used deviation values equal to ± 3 , ± 5 , ± 10 .

According to the results of the analysis of the deformed state, it was revealed that when the angle of the outer layer is deviated by more than 5° , the value of the change in the deformed state is up to 24%.

The change in the stress state in the layers of the blade in this case is very significant (up to 60%). Changes in the angle of installation at the inlet of the blade $\Delta\beta$ of a centrifugal compressor due to changes in the structure reaches 2.5° .

Introducing the initial artificial imbalance of the structure (deviation of the laying angle of the outer layer by -10°), it is possible to reduce the angle of installation at the blade inlet $\Delta\beta$ ($<1.5^\circ$), thereby providing the required gas-dynamic parameters of the flow around the blade in the operating mode.

When simulating a violation of a given stacking sequence, the following points were revealed:

- the change in the deformed state is about 14%;
- a significant change in the stress state in the layers of the blade (up to 40%) in the presence of a violation of the sequence of laying the two outer layers;
- the presence of a change in the angle of installation of the inlet blade of the centrifugal compressor. Depending on the nature of the violation of the folding sequence, the value of $\Delta\beta$ can reach up to 2.3° .

Based on the above results, some conclusions can be drawn:

- deviation from the original structure of the layer of composite material has a great influence on the stress-strain state of the blade itself;
- the magnitude of the change in the stress-strain state depends on the deviations of the stacking angle, the number of layers, the type of loads and the boundary conditions for fixing the blades.

Given the above, it should be noted that it is extremely important to take into account the permissible technological design deviations at the design stage to ensure the reliability of compressor parts.

3. Technologies for the development of a composite compressor with a protective layer

					<i>Приложения</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		133

In 2018, a patent was registered with the number RU 2652269 C2. The authors of the invention are Nikitin S.N., Akhmetov A.M., Yuriev V.L., Gribovsky V.A. and Zhernakov V.S. The application was submitted through the joint-stock company “Institute of Technology and Organization of Production” (JSC NIIT).

This invention is based on the method of manufacturing the impeller of a centrifugal compressor, described in patent RU 2432502. According to this invention, a sufficiently strong wheel is obtained. However, after the final polymerization in the wheel body, there are binders that do not polymerize contacting each other along the polymerization boundary passing through the contour of the blade at the points of its fastening in the support ring and the cover disk.

This is due to the fact that impregnation with a binder and polymerization of the material of the blade and the contour of the blade do not occur simultaneously. The presence of the polymerization boundary and the discontinuity of the binder deteriorate the strength of the structure.

Therefore, the authors propose a method for manufacturing a monolithic impeller, without transition boundaries, eliminating the discontinuity of the binder at the joints of the blades with the cover disk and the support ring, which creates stable strength characteristics of the product.

A method of manufacturing a centrifugal compressor impeller made of a composite material, including cutting out layers of material of the blades, pressing them in a mold, placing and centering the blades in an assembly mold and pressing the wheel, and when cutting layers of material they go beyond the contour of the blades from the side of the root section of the blade for a length greater than the arc length of the support ring between adjacent blades, and on the side of the peripheral section for a length greater than the length of the cover disk arc between adjacent blades, while the outer surfaces of the support ring and the cover disk are equidistant to the aerodynamic surfaces of the gas path, then the blades are placed in a separator molds, and a support ring and a cover disk are preliminarily formed in the separator cavities, after which the separator is placed in a mold and pressed, while the outer surfaces of

					<i>Приложения</i>	<i>Лист</i>
						134
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

the cover disk are formed in the matrix, the outer surfaces of the support ring are formed in the punch, and in the separator internal aerodynamic surfaces of the gas path of the cover and support rings are formed in the generator, the aerodynamic profile of the blades is formed in a mold, characterized in that the layer including the material for forming the aerodynamic profile of the blade and extending beyond the latter is impregnated with a binder, and when the blade is formed, the material emerging beyond its limits, forcibly cooled in a mold, excluding its polymerization, thereby in subsequent operations, maintaining the continuity of the binder, thereby achieving stability of strength characteristics.

The invention presented by the authors discovers a method of manufacturing a solid impeller consisting of a composite. It can be called the fruit of previous research, accumulated knowledge and results obtained in the course of the work.

Patent RU 2611521 C2 shows a compressor impeller made of a composite material with an erosion-resistant coating. The patent is pending by inventors Giovannetti Lacopo and Massini Andrea.

As it has already become clear in the course of the analysis of previous works, composite materials have a number of advantages over their counterparts made of metals. Particularly noteworthy are such characteristics as: low specific gravity of the composite material, resistance to corrosion. However, along with the advantages, there are some disadvantages, which include the destruction of the binder under the influence of high temperatures, as well as low erosion resistance. The low erosion resistance of composite materials can become a serious problem during operation in the gas industry, since the pumped gas, despite gas purification, may contain mechanical impurities and liquid drops.

To solve the problem of low erosion resistance, it is proposed to apply epoxy coatings. But at the same time, these coatings have low adhesion, which do not provide sufficient protection, where the flow of the medium contains solid particles or liquid droplets.

					<i>Приложения</i>	<i>Лист</i>
						135
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Accordingly, the author had to propose a method for the above problems and disadvantages. After a thorough analysis of the issue, several methods were proposed for manufacturing an impeller made of a composite material with an erosion-resistant layer.

For the manufacture of impellers made of a composite material having cavities for the passage of the flow, dissolving casting templates are used. The templates can be made of a water-soluble material that can be dissolved using concentrated acid or alkali solutions. An example of a water-soluble material can be a water-soluble epoxy resin or a material currently known in the market under the trademark AQUAPOUR. In addition to soluble materials, templates can be made of metals such as copper and mild steel (i.e. steel with less than 15% carbon), as well as other metal alloys.

Figure 3 shows a block diagram consisting of several stages. In the first step, molds are made which are shaped to match the negative geometry of the flow cavities. The second step is to cover the template with an erosion-resistant layer. This manufacturing method additionally includes, in a third step, forming a composite material around templates coated with an erosion-resistant layer in accordance with a given geometry of the impeller. At the fourth stage, the process of hardening of the composite material takes place.

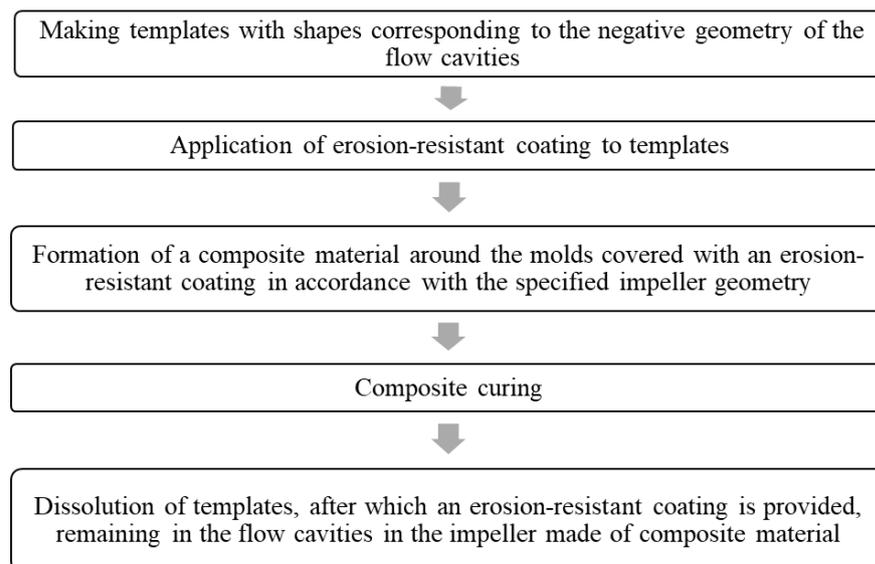


Figure 3 – Flow chart of a method for manufacturing composite impellers with flow cavities having an erosion-resistant coating in accordance with an exemplary embodiment.

Figure 4 shows the method of forming a composite around erosion-resistant molds according to a given impeller geometry, in which the molds covered with an erosion-resistant layer are arranged around the center and surrounded by composite material. The composite material may contain resin. Depending on its exact composition, the curing temperature can be selected from room temperature to several hundred degrees Celsius.

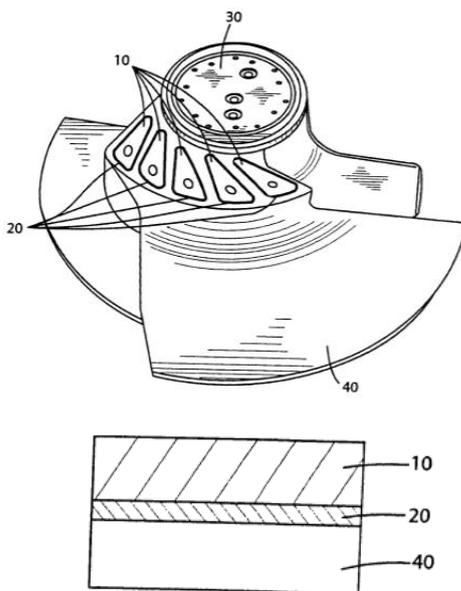


Figure 4 – Schematic representation of a method of forming a composite material around templates

10 - template; 20 - erosion-resistant layer; 30 - central part; 40 composite material

Finally, the last step is to dissolve the casting template. Before the templates dissolve, an erosion-resistant layer is formed at the interface between the template material and the composite material. After dissolution of the template, the composite material and the erosion-resistant layer remain firmly bonded.

The method of applying an erosion-resistant layer to the casting templates depends on the template material. If the template is made of a water-soluble material, a mechanical coating process can be used. If the template is metal, mechanical coating, thermal spraying, physical vapor deposition (PVD), chemical vapor deposition (CVD), or cold spraying processes can be used.

4. Impeller balancing

One of the important topics in the design of a centrifugal unit is impeller balancing. The balancing issue must be addressed for a specific assembly, including a hybrid composite impeller and metal shaft. And a group of researchers from the Romanian Research Institute of Gas Turbines under the leadership of Jani A. Vilaga was tasked with developing a method for dynamic balancing of the impeller of a fiber centrifugal compressor.

Manufacturing the rotor blades of a centrifugal compressor made of composite materials is challenging and represents a new approach. The full cycle of manufacturing a gas turbine blade is multidisciplinary in nature and has three main areas: materials, fluid mechanics and mechanics (rigid body dynamics).

The goal of balancing a rotor is to achieve satisfactory performance when installed in an assembly, to accommodate vibrations caused by unbalance remaining in the rotor. Most rotors are balanced after manufacture due to the difficulty of balancing after assembly.

Imbalance indicates the fact that the center of mass of the rotating part is on the axis of the shaft, or that the main inertial axis and the axis coincide. Balancing consists of adding or removing material to eliminate the strength of the original imbalance.

There are four types of imbalance: static imbalance; imbalance of the couple; quasi-static imbalance; dynamic imbalance.

Causes contributing to rotor imbalance are: problems with poor quality materials, density, porosity, voids and cavities. Manufacturing problems include deformed castings, eccentric machining and poor assembly. Many of them occur during production, others during the life of the machine.

Usually balancing the metal parts of the impellers is achieved by removing material from the hub and rear of the disc. Balancing the impeller made of a composite material is difficult owing to impossibility of material removal. This is due to the fact

					<i>Приложения</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		138

that during machining the disk surface, a reinforcing layer occurs, which can lead to disruption of delamination and the propagation of microcracks. The solution is to apply special paints and putties. The authors also propose adding a metal ring on the inner side of the impeller hub. The metal surface of the inner ring of the hub will make it possible to remove material.

In addition, the paper presents a method for calculating the balance of such a disk – the method of calculating the parameters of the formula.

In conclusion of their work, the authors state that the use of dynamic balancing of a composite impeller of a centrifugal compressor with a metal inner ring has a number of limitations. Despite this, the use of polymeric materials has many advantages over analogues consisting of various alloys.

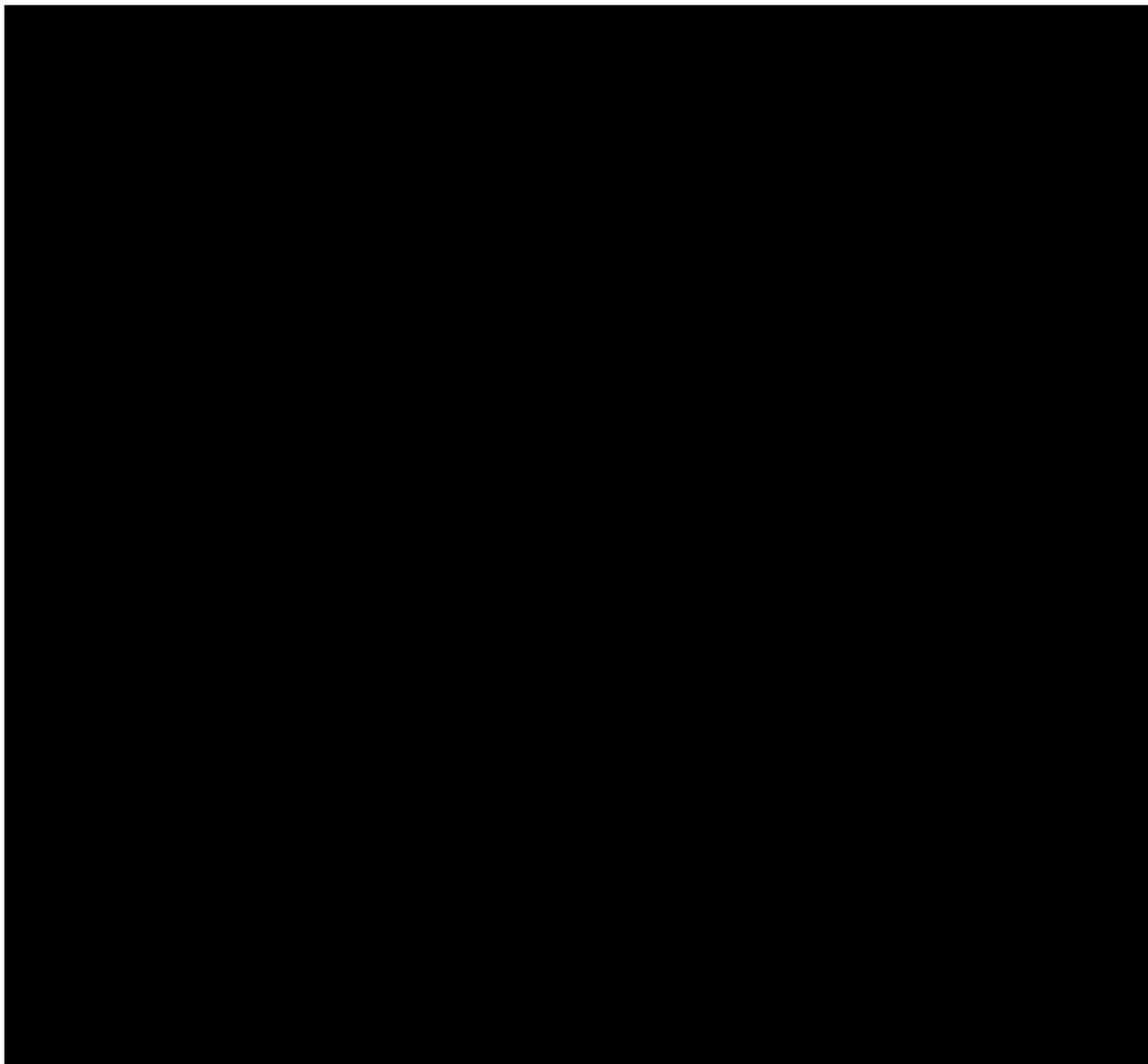
Summarizing all the results obtained in the course of the above studies, the following points can be highlighted:

- High potential for the use of composite materials in the design of impellers of axial, centrifugal compressors;
- The need for further study of possible ways of introducing structures of gas-pumping units consisting of composite materials;
- Search for composite materials that meet all design requirements.

The introduction of technologies based on composites can lead to the solution of many problems that exist in the oil and gas industry.

Приложение Б

Схема подключения резервной азотной станции



					Приложения	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		140

Приложение В
Квантили X^2 распределения

$1-a$ s	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
1	0,00016	0,00063	0,00393	0,0158	0,0642	1,642	2,706	3,841	5,412	6,635
2	0,201	0,0404	0,103	0,211	0,446	3,219	4,605	5,991	7,824	9,210
3	0,115	0,185	0,352	0,5834	1,005	4,642	6,251	7,815	9,837	11,341
4	0,297	0,429	0,711	1,064	1,649	5,989	7,779	9,488	11,668	13,277
5	0,554	0,752	1,145	1,610	2,343	7,289	9,236	11,070	13,388	15,086
6	0,872	1,134	1,635	2,204	3,070	8,558	10,645	12,592	15,033	16,812
7	1,239	1,564	2,167	2,833	3,822	9,803	12,017	14,067	16,622	18,475
8	1,646	2,032	2,733	3,490	4,594	11,030	13,362	15,507	18,168	20,090
9	2,088	2,532	3,325	4,168	5,380	12,242	14,684	16,919	19,679	21,666
10	2,558	3,059	3,940	4,865	6,179	13,442	15,987	18,307	21,161	23,209
11	3,053	3,609	4,575	5,578	6,989	14,631	17,275	19,675	22,618	24,725
12	3,571	4,178	5,226	6,304	7,807	15,812	18,549	21,026	24,054	26,217
13	4,107	4,765	5,892	7,042	8,634	16,985	19,812	22,362	25,472	27,688
14	4,660	5,368	6,571	7,790	9,467	18,151	21,064	23,685	26,873	29,141
15	5,229	5,985	7,262	8,547	10,307	19,311	22,307	24,996	28,259	30,578
16	5,812	6,614	7,962	9,312	11,152	20,465	23,542	26,296	29,633	32,000
17	6,408	7,255	8,672	10,085	12,002	21,615	24,769	27,587	30,995	33,409
18	7,015	7,906	9,390	10,865	12,857	22,760	25,989	28,868	32,346	34,805
19	7,633	8,567	10,117	11,651	13,716	23,900	27,204	30,144	33,687	36,191
20	8,260	9,237	10,851	12,443	14,578	25,038	28,412	31,410	35,020	37,566
21	8,897	9,915	11,591	13,240	15,445	26,171	29,615	32,671	36,343	38,932
22	9,542	10,600	12,338	14,041	16,314	27,301	30,813	33,924	37,369	40,289
23	10,196	11,293	13,091	14,848	17,187	28,429	32,007	35,172	38,968	41,638
24	10,856	11,992	13,848	15,659	18,062	29,553	33,196	36,415	40,270	42,980
25	11,524	12,697	14,611	16,473	18,940	30,675	34,382	37,652	41,566	44,314

В таблице приведены значения квантилей $X^2_{1-a}(s)$ в зависимости от числа степеней свободы s и вероятности $1 - a$