

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа природных ресурсов (ИШПР)  
 Направление подготовки (специальность) 21.03.01 «Нефтегазовое дело»  
 Профиль «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта и хранения нефти, газа и продуктов переработки»  
 Отделение нефтегазового дела

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

Тема работы
«Определение показателей надежности газоперекачивающего агрегата с газотурбинным двигателем»

УДК 622.691.4.052:621.452.3-027.45

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2Б4А	Тян В. Д.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Рудаченко А. В.	к.т.н, доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Макашева Ю. С.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Абраменко Н. С.			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>ОНД ИШПР</b>	Брусник О.В.	к.п.н, доцент		

## ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ПРОГРАММЫ БАКАЛАВРИАТА

### *Планируемые результаты обучения*

<i>Код результата</i>	<i>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</i>	<i>Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон</i>
<b><i>В соответствии с универсальными, общепрофессиональными и профессиональными компетенциями</i></b>		
<b><i>Общие по направлению подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело»</i></b>		
P1	Применять базовые естественнонаучные, социально-экономические, правовые и специальные знания в области нефтегазового дела, самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	<i>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, УК-6, УК-7, ОПК-1, ОПК-2), (ЕАС-4.2, АВЕТ-3А, АВЕТ-3i).</i>
P2	Решать профессиональные инженерные задачи на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности	<i>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-2, УК-3, УК-4, УК-5, УК-8, ОПК-2, ОПК-6, ОПК-7).</i>
<i>в области производственно-технологической деятельности</i>		
P3	Применять процессный подход в практической деятельности, сочетать теорию и практику при эксплуатации и обслуживании технологического оборудования нефтегазовых объектов	<i>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-5, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-6, ПК-7, ПК-8, ПК-9, ПК-10, ПК-11).</i>
P4	Оценивать риски и определять меры по обеспечению безопасности технологических процессов в практической деятельности и применять принципы рационального использования природных ресурсов и защиты окружающей среды в нефтегазовом производстве	<i>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-8, ОПК-6, ПК-12, ПК-13, ПК-14, ПК-15).</i>
<i>в области организационно-управленческой деятельности</i>		
P5	Эффективно работать индивидуально и в коллективе по междисциплинарной тематике, организовывать работу первичных производственных подразделений, используя принципы менеджмента и управления персоналом и обеспечивая корпоративные интересы	<i>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-3, УК-8, ОПК-3, ОПК-7, ПК-16, ПК-17, ПК-18), (ЕАС-4.2-h), (АВЕТ-3d).</i>
P6	Участвовать в разработке организационно-технической документации и выполнять задания в области сертификации нефтегазопромыслового оборудования	<i>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-2, ОПК-1, ОПК-2, ОПК-7, ПК-19, ПК-20, ПК-21, ПК-22).</i>
<i>в области экспериментально-исследовательской деятельности</i>		
P7	Получать, систематизировать необходимые данные и проводить эксперименты с использованием современных методов	<i>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-</i>

<i>Код результата</i>	<i>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</i>	<i>Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон</i>
	моделирования и компьютерных технологий для решения расчетно-аналитических задач в области нефтегазового дела	2, ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6, ПК-23, ПК-24, ПК-25, ПК-26).
<i>в области проектной деятельности</i>		
P8	Использовать стандартные программные средства для составления проектной и рабочей и технологической документации объектов бурения нефтяных и газовых скважин, добычи, сбора, подготовки, транспорта и хранения углеводородов	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-2, ОПК-3, ОПК-5, ОПК-6, ПК-27, ПК-28, ПК-29, ПК-30), (АВЕТ-3с), (ЕАС-4.2-е).
<b>Профиль «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта и хранения нефти, газа и продуктов переработки»</b>		
P9	Применять диагностическое оборудование для проведения технического диагностирования объектов ЛЧМГ и ЛЧМН	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ОПК-4, ОПК-5, ПК-9, ПК-14), требования профессионального стандарта 19.016 "Специалист по диагностике линейной части магистральных газопроводов".
P10	Выявлять неисправности трубопроводной арматуры, камер пуска и приема внутритрубных устройств, другого оборудования, установленного на ЛЧМГ и ЛЧМН	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ОПК-5, ОПК-6, ПК-9, ПК-11), требования профессионального стандарта 19.010 "Специалист по транспортировке по трубопроводам газа".
P11	Оценивать результаты диагностических обследований, мониторингов, технических данных, показателей эксплуатации объектов ЛЧМГ и ЛЧМН	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ОПК-6, ОПК-7, ПК-4, ПК-7, ПК-13), требования профессионального стандарта 19.010 "Специалист по транспортировке по трубопроводам газа".



<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Изучение нормативно-технической документации. Анализ неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации газоперекачивающего агрегата и пути повышения его эксплуатационной надежности. Анализ диагностических методов и форм технического обслуживания.</p>
--	---

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Макашева Ю. С.
«Социальная ответственность»	Абраменко Н. С.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	25.03.2018г
--	-------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Рудаченко А. В.	к.т.н, доцент		25.03.2018

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2Б4А	Тян Вадим Денхакович		25.03.2018

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
2Б4А	Тян Вадиму Денхаковичу

<b>Инженерная школа</b>	<b>Природных ресурсов</b>	<b>Отделение</b>	<b>Нефтегазового дела</b>
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	21.03.01 «Нефтегазовое дело» профиль «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта и хранения нефти, газа и продуктов переработки»

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	
1. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Нормы расхода материалов, тарифные ставки заработной платы рабочих, нормы амортизационных отчислений, нормы времени на выполнение операций.</i>
2. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>На основании п. 1 ст. 58 закона № 212-ФЗ ставка для расчета отчислений во внебюджетные фонды составляет 30 % от фонда оплаты труда.</i>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. <i>Расчет нормативной продолжительности выполнения работ</i>	<i>Расчет необходимого времени для проведения замены нагнетателя. Продолжительность работ – 8 дня (замена нагнетателя – 5 дней, пусконаладочные работы – 3 дня)</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета ремонтных работ</i>	<i>Рассчитать: затраты на материалы и оборудования; затраты на спецтехнику; затраты на оплату; отчисления в социальные нужды Результатом формирования бюджета является составление сметного расчета работ Результатом планирования выполнения всех работ является составление графика выполнения работ.</i>
<b>Перечень графического материала</b>	<i>График выполнения работ</i>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ассистент	Макашева Ю. С.			

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
2Б4А	Тян В.Д.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
2Б4А	Тян Вадиму Денхаковичу

<b>Инженерная школа</b>	<b>Природных ресурсов</b>	<b>Отделение</b>	<b>Нефтегазового дела</b>
Уровень образования		Направление/специальность	21.03.01 «Нефтегазовое дело» профиль «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта и хранения нефти, газа и продуктов переработки»

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объектом данного исследования является ГПА компрессорной станции, предназначенная для сжатия газа.</p> <p>На объекте используются и транспортируются взрывоопасные вещества (природный газ).</p> <p>При возникновении аварий на данном объекте возможны большие утечки газа, что негативно влияет на окружающую среду.</p> <p>Взрыв газа на объекте может стать причиной чрезвычайной ситуации</p>
--	---

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

**1. Производственная безопасность**

1.1 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению	<p>Проанализировать вредные производственные факторы при проведении работ по повышению эксплуатационной надежности ГПА:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>превышение шума</i></li> <li>– <i>превышение уровней вибрации</i></li> <li>– <i>превышение уровней ионизирующих излучений</i></li> <li>– <i>недостаточная освещенность рабочей зоны</i></li> <li>– <i>повышенная запыленность и загазованность рабочей зона</i></li> <li>– <i>повреждения в результате контакта с животными, насекомыми, пресмыкающимися</i></li> </ul>
---	---

<b>1.2. Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению</b>	Проанализировать опасные производственные факторы при проведении работ по повышению эксплуатационной надежности ГППА: – движущиеся машины и механизмы производственного оборудования – электрический ток – оборудование и трубопроводы, работающие под давлением
<b>2. Экологическая безопасность:</b>	Проанализировать: – воздействие объекта на литосферу; – воздействие объекта на гидросферу; – воздействие объекта на атмосферу. – воздействие на окружающую среду
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	– рассмотреть перечень возможных ЧС на объекте; – рассмотреть меры по предотвращению ЧС – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации ее последствий.
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>	Рассмотреть: – специальные правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент ОКД	Абраменко Н.С.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2Б4А	Тян Вадим Денхакович		

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа природных ресурсов (ИШПР)  
 Направление подготовки (специальность) 21.03.01 «Нефтегазовое дело»  
 Профиль «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта и хранения нефти, газа и продуктов переработки»  
 Уровень образования бакалавриат  
 Отделение нефтегазового дела  
 Период выполнения \_\_\_\_\_ (осенний / весенний семестр 2017/2018 учебного года) \_\_\_\_\_

Форма представления работы:

бакалаврская работа
---------------------

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**  
**выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	21.06.2018г
--	-------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
12.03.2018	<i>Введение</i>	10
25.03.2018	<i>Анализ работ по определению показателей надежности</i>	15
20.04.2018	<i>Надежность и ее составляющие</i>	15
22.04.2018	<i>Анализ методов неразрушающего контроля технического состояния ГПА</i>	15
	<i>Расчетная часть</i>	10
09.05.2018	<i>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</i>	10
18.05.2018	<i>Социальная ответственность</i>	10
20.05.2018	<i>Заключение</i>	5
24.05.2018	<i>Презентация</i>	10
	<i>Итого</i>	100

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Рудаченко А. В.	к.т.н, доцент		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>ОНД ИШПР</b>	Брусник О.В.	к.п.н, доцент		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 92 страниц, 8 рисунков, 9 таблиц, 41 источник.

*Ключевые слова:* газоперекачивающий агрегат, газотурбинная установка, осевой компрессор, камера сгорания, турбина, неисправность, отказ, дефект, диагностика, техническое обслуживание.

*Объектом исследования является* газоперекачивающий агрегат с газотурбинным двигателем.

*Цель работы:* выбор методов повышения эксплуатационной надежности ГТД.

*В результате работы:* проведен анализ неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации ГТУ; проведен анализ методов неразрушающего контроля ГТУ; определена оптимальная форма технического обслуживания ГТУ; проведен расчет термогазодинамических параметров ГТУ.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
					<i>Определение показателей надежности газоперекачивающего агрегата с газотурбинным двигателем</i>			
<i>Разраб.</i>		<i>Тян В. Д.</i>			<i>Реферат</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		<i>Рудаченко А. В.</i>					10	92
<i>Консульт.</i>						<i>НИ ТПУ гр. 2Б4А</i>		
<i>Рук-ль ООП</i>		<i>Брусник О.В.</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.

**Газотурбинная установка** – конструктивно-объединенная совокупность газотурбинного двигателя, газовоздушного тракта, системы управления и вспомогательных систем.

**Газотурбинный двигатель** – часть газотурбинной установки, состоящей из газовой турбины, компрессора (компрессоров), камер сгорания, систем управления и вспомогательных агрегатов.

**Компрессор** – компонент газотурбинного двигателя, повышающий давление в рабочем теле.

**Турбина (газовая)** – компонент газотурбинного двигателя, преобразующий потенциальную энергию нагретого рабочего тела под давлением в механическую работу.

**Неисправность** – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

**Отказ** – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

					<i>Определение показателей надежности газоперекачивающего агрегата с газотурбинным двигателем</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		Тян В. Д.			<i>Определения, обозначения и сокращения</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		Рудаченко А. В.					11	92
<i>Консульт.</i>						<i>НИ ТПУ гр. 2Б4А</i>		
<i>Рук-ль ООП</i>		Брусник О.В.						

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

КС – компрессорная станция;

ГТУ – газотурбинная установка;

ГТД – газотурбинный двигатель;

ГПА – газоперекачивающий агрегат;

ОК – осевой компрессор;

МГ – магистральный газопровод;

ТО – техническое обслуживание;

КИПиА – контрольно-измерительные приборы и средства автоматики;

					<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

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	15
1 АНАЛИЗ РАБОТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ..	17
2 НАДЕЖНОСТЬ И ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ .....	20
2.1 Единичные показатели надежности .....	21
2.1.1 Показатели безотказности .....	21
2.1.2 Показатели долговечности.....	24
2.1.3 Показатели ремонтпригодности.....	25
2.2 Комплексные показатели надежности .....	25
3 АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ НАДЕЖНОСТИ ГПА.....	28
3.1 Виды отказов и периоды функционирования технической системы .....	28
3.1.1 Классификация отказов оборудования .....	28
3.1.2 Основные периоды функционирования оборудования.....	31
3.1.3 Связь характера отказов с периодами функционирования оборудования.....	31
3.3 Классификация и анализ причин отказов ГПА .....	34
3.3.1 Определение основных неисправностей ГПА.....	34
3.3.2 Анализ причин возникновения неисправностей ГПА.....	36
4. АНАЛИЗ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГПА .....	43
4.1 Характеристика технического состояния ГПА .....	43
4.2 Методы неразрушающего контроля технического состояния ГПА .....	44
4.2.1 Метод трибодиагностики.....	44
4.2.2 Вибрационная диагностика ГТД .....	46
4.2.3 Параметрическая диагностика.....	51
4.3 Обеспечение диагностирования ГТД инструментальными методами .....	53
4.3.1 Визуально-измерительный метод диагностирования .....	54
4.3.2 Ультразвуковой метод диагностирования .....	55
4.3.3 Вихретоковый метод диагностирования.....	56

					<i>Определение показателей надежности газоперекачивающего агрегата с газотурбинным двигателем</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Тян В. Д.</i>			<i>Оглавление</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		<i>Рудаченко А. В.</i>					13	92
<i>Консульт.</i>						<i>НИ ТПУ гр. 2Б4А</i>		
<i>Рук-ль ООП</i>		<i>Брусник О.В. А.В.</i>						

5	ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ВИДЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ГПА .....	57
5.1	Основные формы технического обслуживания оборудования .....	58
6	РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ .....	61
6.1	Расчет термогазодинамических параметров ГТУ .....	61
6.2	Анализ полученных результатов .....	67
7	ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ .....	68
7.1	Расчет нормативной продолжительности выполнения работ .....	68
7.3	Отчисления на социальные нужды .....	71
7.4	Оценка эффективности .....	72
8.	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....	73
8.1	Введение .....	73
8.2	Производственная безопасность .....	73
8.2.1	Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению .....	75
8.2.2	Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению .....	78
8.3	Экологическая безопасность .....	82
8.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	84
8.5	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	85
	СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	88

## ВВЕДЕНИЕ

Основные месторождения газа в России расположены в Ямало-Ненецком автономном округе, в Астраханской и Иркутской областях, а также в Красноярском крае. Все эти месторождения расположены на значительных расстояниях от потребителей. Транспортировка газа к ним осуществляется по газопроводам. Газопроводы позволяют обеспечить бесперебойную и равномерную поставку значительного объема газа при сравнительно небольших экономических расходах.

При транспортировке газа по трубопроводу часть энергии затрачивается на преодоление сил трения, что способствует падению давления. Для поддержания оптимального давления в трубопроводе на определенных расстояниях устанавливаются компрессорные станции. Для этой цели на компрессорных станциях используются ГПА с электрическим и газотурбинным приводом. Доля агрегатов с электрическим приводом составляет 13 %, с газотурбинным – 86,5 %.

На сегодняшний день одно из направлений, обеспечивающее бесперебойную поставку природного газа, является повышение надежности и эффективности КС с газотурбинными ГПА. В связи с этим, исследование и разработка эффективных методов контроля технологических параметров энергетической установки в период функционирования, выявление дефектов и неисправностей на раннем этапе их возникновения является весьма актуальной проблемой. Опыт эксплуатации ГПА показывает, что использование комплексных методов диагностики позволяет оптимизировать структуру обслуживания и снизить стоимость ремонта оборудования, является наиболее значимым средством повышения качества и надежности эксплуатации КС МГ.

*Актуальность работы.* На КС магистральных газопроводов газотурбинные двигатели являются основным приводом газоперекачивающих

					<i>Определение показателей надежности газоперекачивающего агрегата с газотурбинным двигателем</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		Тян В. Д.			<i>Введение</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		Рудаченко А. В.					15	92
<i>Консульт.</i>						<i>НИ ТПУ гр. 2Б4А</i>		
<i>Рук-ль ООП</i>		Брусник О.В.						

агрегатов. Для поддержания работоспособного состояния агрегата необходимо выполнять работы, направленные на повышение надежности ГПА с газотурбинным двигателем.

*Объект исследования.* Газоперекачивающее оборудование компрессорной станции магистрального газопровода с газотурбинным приводом.

*Предмет исследования.* Определение показателей надежности агрегата.

*Цель работы.* Выбор методов повышения эксплуатационной надежности ГТД.

Для достижения данной цели необходимо выполнить задачи:

- 1) Проанализировать причины возникновения неисправностей в процессе эксплуатации ГТД.
- 2) Проанализировать методы обследования текущего технического состояния.
- 3) Определить возможные пути повышения эксплуатационной надежности ГПА на компрессорной станции.

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

# 1 АНАЛИЗ РАБОТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

На сегодняшний день ГТУ приобретают все более широкое применение в различных отраслях производственных компаний. Такое широкое применение ГПА с ГТП обусловлено рядом преимуществ ГТУ перед их основными конкурентами. К достоинствам ГТУ можно отнести:

- высокую удельную мощность на единицу массы;
- возможность использования автоматизированного управления;
- возможность использовать перекачиваемый газ в качестве топлива;
- возможность регулировать подачу технологического газа, изменяя частоту вращения ротора силовой турбины ГТУ;
- относительно малый расход воды и масла;
- простота конструкции и обслуживания;
- возможность дальнейшего улучшения основных показателей ГТУ.

Наиважнейшими направлениями развития газотранспортных предприятий являются внедрение доступных и эффективных методов:

- повышения экономичности, экологичности и надежности ГТУ;
- повышения КПД ГТУ.

Многие авторы занимались исследованием задач по повышению надежности и экономичности ГТУ. Основной вклад внесли Тереньтьев А.Н., Седых З.С., Дубинский В.Г., [1] Козаченко А.Н., [2] Поршаков Б.Н., Апостолов А.А. и другие [9].

Важнейшие работы, которые наиболее полно теоретические основы ГТУ, являются работы Чухаревой Н.В., Рудаченко А.В. [5]; Корж В.В., Сальников А.В. [3].

					<i>Определение показателей надежности газоперекачивающего агрегата с газотурбинным двигателем</i>				
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>					
<i>Разраб.</i>		Тян В. Д.			<i>Анализ работ по определению показателей надежности</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>	
<i>Руковод.</i>		Рудаченко А. В.						17	92
<i>Консульт.</i>						<i>НИ ТПУ гр. 2Б4А</i>			
<i>Рук-ль ООП</i>		Брусник О.В.							

Современная КС на магистральном газопроводе, оборудованная ГПА с ГТП, является комплексной по структуре и функциональным связям систему. Совершенствование средств комплексной автоматизации КС, уменьшение числа обслуживающего персонала, уменьшение массы и габаритных размеров ГПА, использование в сложных погодных условиях требует обеспечение высокой надежности работы создаваемых и эксплуатируемых ГПА.

Обеспечение надежной работы ГПА зависит от решения комплекса научных, технических, экономических и организационных задач на всех этапах, начиная от проекта ГПА вплоть до его эксплуатации. Решение задач надежности связано с развитием теории надежности, которая основана на использовании методов прикладной математики - теории вероятностей и математической статистики. На сегодняшний день развитие сложных технических систем, как например ГПА с ГТП, требует специальные количественные критерии оценки надежности.

Критерием надежности задаются эксплуатируемые и вновь создаваемые ГПА, так как это является необходимым условием для получения максимальной эффективности при их использовании системах магистральных газопроводов. Теория надежности позволяет принимать оптимальные решения при проектировании и эксплуатации ГПА.

На этапе проектирования теория надежности позволяет проектировщикам модернизировать конструкции отдельных ненадежных узлов, при необходимых характеристиках создать такой агрегат, который при минимальной стоимости позволит добиться наилучших технических показателей. В процессе эксплуатации теория надежности определяет периодичность и объем регламентных и профилактических работ, потребность в запасных частях для ремонта агрегатов, а также эксплуатационные ресурсы отдельных узлов и деталей. Точность данных о надежности эксплуатируемых агрегатов зависит от организации системы сбора, обработки и анализа информации об отказах и неисправностях агрегатов, получаемой непосредственно от КС. Вместе с тем огромную роль играют рациональные

					<i>Анализ работ по определению показателей надежности</i>	<i>Лист</i>
						18
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

формы сбора данных о надежности агрегатов, обработка их на ЭВМ и оперативная информация эксплуатационного персонала, заводов-изготовителей, проектных и научно-исследовательских организаций о результатах анализа.

Вопросы надежности особо актуальны в газовой промышленности. Прирост мощностей КС будет осуществляться за счет ГПА с ГТП. Для повышения надежности ГПА предстоит решить задачи такие как: увеличение моторесурса, межремонтного ресурса и уменьшение времени простоев.

					<i>Анализ работ по определению показателей надежности</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		19

## 2 НАДЕЖНОСТЬ И ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ

Надежность является одной из важнейших эксплуатационных характеристик ГПА. В соответствии с ГОСТ 27.002-89 «надежность объекта определяется как свойство объекта, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки».

Надежность – это комплексное свойство, включающее безотказность, долговечность и ремонтпригодность.

В настоящее время оценка показателей надежности ГПА на газопроводах осуществляется системой показателей, основанных на определении времени нахождения агрегата в том или ином эксплуатационном состоянии:

- суммарном времени нахождения агрегата в работе  $T_p$  за отчетный период  $T_k$ ;
- времени нахождения агрегата в резерве  $T_{рез}$ ;
- времени нахождения агрегата в плановом ремонте  $T_{ппр}$ ;
- времени вынужденного простоя  $T_{вп}$ .

Обычно за отчетный период принимается календарный год:

$$T_k = T_p + T_{рез} + T_{ппр} + T_{вп} = 365 \text{ дней} \quad (1)$$

На основе сопоставления приведенных временных состояний агрегата и определяются показатели его надежности.

В практике оценки надежности ГПА используют показатели, приведенные в таблице 1.

					<i>Определение показателей надежности газоперекачивающего агрегата с газотурбинным двигателем</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Тян В. Д.</i>			<i>Надежность и ее составляющие</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		<i>Рудаченко А. В.</i>					20	92
<i>Консульт.</i>						<i>НИ ТПУ гр. 2Б4А</i>		
<i>Рук-ль ООП</i>		<i>Брусник О.В.</i>						

Таблица 1 – Показатели надежности

Свойство	Показатель	Обозначение
Единичные		
Безотказность	Вероятность безотказной работы	$P(t)$
	Интенсивность отказов	$\lambda(t)$
	Параметр потока отказов	$\omega(t)$
	Среднее время безотказной работы	$T_{ср}$
	Наработка на отказ	$T_{н.о}$
	Среднее время межремонтного периода	$T_{м.р}$
	Коэффициент относительной частоты пусков	$k_{п}$
Долговечность	Назначенный предельный ресурс	$T_{н}$
	Эксплуатационный ресурс	$T_{э}$
	Гамма-процентный эксплуатационный ресурс	$T_{э\%}$
Ремонтопригодность	Вероятность восстановления	$P_{в}$
	Средняя продолжительность внепланового ремонта	$T_{в.п}$
	Средняя продолжительность планового ремонта	$T_{ППР}$
Комплексные		
Безотказность и ремонтпригодность	Коэффициент готовности	$k_{г}$
	Коэффициент оперативной готовности	$k_{о.г}$
	Коэффициент технического использования	$k_{т.и}$

## 2.1 Единичные показатели надежности

### 2.1.1 Показатели безотказности

«Вероятность безотказной работы – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ агрегата не возникнет» [11]

$$P(t) = \frac{N-n(t)}{N} \quad (2)$$

где  $N$  – число агрегатов, исправных в начальный момент времени;

$n(t)$  – число агрегатов, отказавших в рассматриваемом интервале времени

$\Delta(t)$ .

					Надежность и ее составляющие	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

Вероятность безотказной работы определяет уровень надежности в течение определенной наработки агрегата.

«Интенсивность отказов – условная плотность вероятности отказа, определяемая для рассматриваемого момента времени в предположении, что до этого момента отказ не возник» [11]

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N \cdot \Delta(t)} \quad (3)$$

Интенсивность отказов описывает степень надежности одноименных элементов агрегатов, выходящий из строя в ходе эксплуатации. Подразумевается, что в момент времени, в который происходит исследование, элемент полностью вышел из строя и не подлежит восстановлению. Сущность интенсивности отказов с физической точки зрения является характеристикой скорости роста отказов элементов в период работы. Для количественной оценки безотказности агрегатов в межремонтный период используют параметр поток отказов. Под параметром потока отказов понимают плотность вероятности возникновения отказов восстанавливаемого объекта, определяемого в рассматриваемый период времени [1].

$$\omega(t) = \frac{r(t)}{N(t)} \quad (4)$$

Параметр потока отказов, обусловленный разрушением узлов и деталей ГПА, – среднее число отказов механической части, приходящихся на каждую тысячу часов работы агрегатов,

$$\omega = \frac{r_{\text{рем.}} \cdot 1000}{T_p} \quad (5)$$

где  $T$  – суммарная наработка агрегатов за отчетный период, ч.

В ходе определения ресурса работы различных элементов технологического оборудования ГПА применяется понятие «параметр потока отказов» для всех узлов агрегата:

					Надежность и ее составляющие	Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\omega_{\text{д}} = \frac{r_{\text{рем.д.}} \cdot 1000}{T_{\text{р.д.}}} \quad (6)$$

где  $\omega_{\text{д}}$  – среднее число разрушений данной детали (или узла) из расчета на 1000 ч ее работы;  $r_{\text{рем.д.}}$  – суммарное число разрушений одноименных деталей (узлов) за отчетный период, включая разрушения деталей (узлов), обнаруженных при ППР;  $T_{\text{р.д.}}$  – суммарная наработка одноименных деталей (узлов) до разрушения, ч.

«Среднее время безотказной работы – ожидаемое среднее по парку время, в течение которого агрегат работает безотказно» [11],

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} = \frac{1}{\omega} \quad (7)$$

где  $t_i$  – наработка до первого отказа  $i$ -го агрегата после, его восстановления.

*Наработка на отказ*  $T_o$  характеризует среднюю продолжительность предстоящей безотказной работы и определяется как отношение суммарной наработки агрегатов к числу отказов в течение этой наработки

$$T_o = \frac{1}{r} \cdot \sum_{i=1}^N T_{\text{р}i} \quad (8)$$

где  $T_{\text{р}i}$  – суммарная наработка каждого  $i$ -го агрегата за отчетный период эксплуатации, ч;  $N$  – число эксплуатируемых агрегатов;  $r$  – суммарное число отказов агрегатов за отчетный период.

*Среднее время межремонтного периода* представляет собой отношение суммы продолжительности межремонтных периодов агрегатов парка к числу агрегатов

$$T_{\text{м.р}} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{\text{м.р}i}}{N} \quad (9)$$

где  $T_{\text{м.р}i}$  – продолжительность межремонтного периода  $i$ -го агрегата.

					Надежность и ее составляющие	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

«Коэффициент частоты пусков – среднее число пусков ГПА из расчета на 1000 ч работы агрегатов» [1]

$$k_{\Pi} = \frac{\Pi \cdot 1000}{T_p} \quad (10)$$

где  $\Pi$  – суммарное число пусков за отчетный период.

### 2.1.2 Показатели долговечности

Одним из основных критерием оценки долговечности является ресурс, который определяется наработкой объекта до предельного состояния.

Назначенный предельный ресурс – назначенная заводом-изготовителем суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена, а объект заменен. Назначенный ресурс соответствует предельному состоянию элемента. Он устанавливается заводом-изготовителем на основании предшествующего опыта конструирования и эксплуатации, физико-химических свойств материалов, прочностных и динамических расчетов, результатов различных испытаний.

Эксплуатационный ресурс – суммарная наработка объекта до предельного состояния в реальных условиях эксплуатации. Предельный эксплуатационный ресурс не всегда совпадает с назначенным заводом ресурсом, так как в реальных условиях эксплуатации встречается колебание режимов работы, отклонение в технологии ремонтов и т. д. Для анализа долговечности применяется также гамма-процентный эксплуатационный ресурс, который представляет наработку агрегатов с начала эксплуатации до разрушения одноименных элементов на  $\gamma$  агрегатов парка [1].

					<i>Надежность и ее составляющие</i>	<i>Лист</i>
						24
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

### 2.1.3 Показатели ремонтпригодности

«Вероятность восстановления – вероятность того, что фактическая продолжительность работ по восстановлению работоспособности однотипных агрегатов не превысит заданной» [1]:

$$P_B = \frac{n^*(t)}{n(t)} \quad (11)$$

где  $n^*(t)$  – число агрегатов, время восстановления работоспособности которых не превысило заданного в рассматриваемый период;  $n(t)$  – суммарное число отказавших агрегатов.

«Средняя продолжительность внепланового ремонта – среднее время внепланового восстановления работоспособности отказавших однотипных агрегатов парка в рассматриваемый период» [11]

$$T_{м.р} = \frac{\sum_1^n T_{в.пi}}{n(t)} \quad (12)$$

где  $T_{в.пi}$  – продолжительность внепланового восстановления  $i$ -го отказа;  $n(t)$  – число отказов.

«Средняя продолжительность планового ремонта – среднее время планового восстановления агрегатов парка в рассматриваемый период» [1]

$$T_{ППР} = \frac{\sum_1^{N_{ППР}} T_{ППРi}}{N_{ППР}} \quad (13)$$

где  $T_{ППРi}$  – время проведения планового восстановления  $i$ -го агрегата;  $N_{ППР}$  – число плановых ремонтов.

### 2.2 Комплексные показатели надежности

Для того, чтобы определить надежность того или иного элемента, исполь-

					Надежность и ее составляющие	Лист
						25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

зуют ряд комплексных показателей безотказности и ремонтпригодности.

*«Коэффициент готовности ГПА с агрегатными системами – вероятность того, что ГПА вместе со всеми вспомогательными системами будет работоспособным в произвольно выбранный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых предусматривается выполнение планового технического обслуживания» [1]*

$$k_{\Gamma} = \frac{T_p}{T_p + T_{в.п}} \quad (14)$$

*«Коэффициент готовности механической части ГПА – отношение среднего времени безотказной работы к сумме среднего времени безотказной работы и среднего времени восстановления – характеризует надежность механической части» [1]:*

$$k_{\Gamma.м} = \frac{T_{p.ср}}{T_{p.ср} + T_{рем.ср}} \quad (15)$$

где  $T_{p.ср}$  – среднее время безотказной работы, т. е. среднее значение наработки агрегата между отказами, которые возникли по причине разрушения узлов и деталей,

$$T_{p.ср} = \frac{1}{r_{рем}} \cdot \sum_{i=1}^N T_{pi} \quad (16)$$

$N$  - число ГПА;  $T_{pi}$  – наработка каждого  $i$ -го агрегата за отчетный период эксплуатации;  $r_{рем}$  – суммарное число отказов по причине разрушения узлов и деталей агрегатов;  $T_{рем.ср}$  – среднее время восстановления, т. е. среднее время вынужденного не регламентированного простоя, вызванного отысканием и устранением одного отказа, ч. В этом случае рассматриваются отказы, которые произошли по причине разрушения узлов и деталей, и устранение неисправности по механической части (аварийный ремонт):

					<i>Надежность и ее составляющие</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		26

$$T_{\text{рем.ср}} = \frac{1}{r_{\text{рем}}} \cdot \sum_{i=1}^{r_{\text{рем}}} T_{\text{рем}i} \quad (17)$$

$T_{\text{рем}i}$  – время восстановления узлов и деталей после каждого  $i$ -го отказа, ч.

«Коэффициент технического использования – вероятность того, что агрегат окажется работоспособным в промежутке между нахождением в резерве» [1] – определяется как отношение наработки ГПА за отчетный период эксплуатации к сумме этой наработки и времени всех простоев, вызванных техническим обслуживанием и ремонтами за то же время эксплуатации,

$$k_{\text{т.и}} = \frac{T_p}{T_p + T_{\text{в.п}} + T_{\text{ППР}}} \quad (18)$$

«Коэффициент оперативной готовности – вероятность того, что в любой момент времени агрегат находится в работе или готов к работе по требованию в заданных условиях эксплуатации» [1]

$$k_{\text{о.г}} = \frac{T_{\text{р.ср}}}{T_{\text{р.ср}} + T_{\text{рем.ср}}} \quad (19)$$

					Надежность и ее составляющие	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### 3 АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ НАДЕЖНОСТИ ГПА

#### 3.1 Виды отказов и периоды функционирования технической системы

Возникновение отказа никогда не бывает мгновенным – всегда прослеживается некий конечный промежуток времени между причиной и следствием. Чаще всего отказ может возникнуть в том случае, если причина не устранена в необходимый срок, в ходе которого есть возможность организации превентивных мер, направленных на устранение образования опасной ситуации, в том случае, если опасность выявлена. В связи с этим, способы анализа технического состояния агрегатов классифицируются на основании информации об отказах каждого из элементов. Методология определения вида отказов каждого из элементов есть основной фактор для распознавания настоящей причины поломки оборудования.

##### 3.1.1 Классификация отказов оборудования

Исходя из своей физической природы, отказы характеризуются как [3]:

- связанные с разрушением деталей и их поверхностей - поломки, различные виды повреждений износа, старения, коррозии;
- не связанные с разрушениями - низкая вязкость масла, нарушение регулировки узлов, облитерация каналов подачи топлива и смазки, ослабление резьбовых соединений, дисбаланс. Исходя из этого, отказы устраняют установкой новых деталей, регулированием или очисткой.

По мере дальнейшего эксплуатирования изделий отказы разделяют на:

- полные, которые не позволяют эксплуатировать изделия до устране-

					<i>Определение показателей надежности газоперекачивающего агрегата с газотурбинным двигателем</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		Тян В. Д.			<i>Анализ критериев надежности ГПА</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		Рудаченко А. В.					28	92
<i>Консульт.</i>						<i>НИ ТПУ гр. 2Б4А</i>		
<i>Рук-ль ООП</i>		Брусник О.В.						

ния отказа;

- частичные, при наличии которых элемент можно использовать на пониженной скорости или с неполной мощностью.

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

Отказы, в зависимости от их причин возникновения, можно подразделить на группы [3]:

Производственные - отказы, вызванные случайным разбросом или ограниченностью сроков службы комплектующих элементов, случайными неблагоприятными сочетаниями разбросов параметров отдельных элементов в пределах установленных допусков, случайными неблагоприятными сочетаниями режимов работы или условиями эксплуатации и т.д. Отказы данной группы характерны тем, что они зачастую возникают не повторяющимися для разных экземпляров системы причинами. Выявление отказов этой группы на одном элементе той же системы не предоставляет оснований делать заключение о ненадежности остальных;

Неизбежно-эксплуатационные - отказы, которые возникают вследствие износа подвижных частей агрегата под воздействием сил трения или по причине долговременного влияния знакопеременных (силовых и температурных) и пульсирующих нагрузок, коррозии.

Независимо к какой группе принадлежат отказы, все они классифицируются по принципу [3]:

- первичные отказы;
- вторичные отказы;
- ошибочные команды.

Первичный отказ означает, что элемент находится в нерабочем состоянии, из-за неисправности самого элемента. Для того, чтобы вернуть элемент в рабочее состояние необходимо провести ремонт элемента или заме-

					<i>Анализ критериев надежности ГПА</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		29

нить его на новый. Первичные отказы возникают при входных воздействиях, значения которых находятся в пределах, лежащих в расчетном диапазоне, а причинами отказов является естественное старение элементов.

Вторичный отказ – такой же, как первичный, исключая то, что сам элемент не является причиной отказа. Вторичные отказы возникают в следствие воздействий предыдущих или текущих избыточных напряжений на элементы. Частота, амплитуда, продолжительность действия этих напряжений из-за чего возможен выход за пределы допусков или может быть обратная полярность и вызванная различными источниками энергии: механической, термической, химической, электрической и т.п. [3]

Эти напряжения возникают в результате взаимодействия с соседними элементами или окружающей средой, а также воздействием со стороны других технических систем.

Ошибочные команды представляются как элемент, который находится в неработоспособном состоянии вследствие неправильного сигнала управления или помех, при этом, данный элемент обычно не нуждается в ремонте для возвращения в рабочее состояние.

Для того, чтобы дать оценку надежности системы и точности определения ее реального технического состояния необходимо рассмотреть такое определение как дефект – повреждение элемента без потери работоспособности оборудования. Как правило, любой отказ сопровождается развивающимися дефектами и неисправностями. Поиск дефекта заключается в нахождении его местоположения в объекте с определённой степенью точностью (и) или прогнозирование его развития на установленном отрезке времени эксплуатации агрегата. Проблема нахождения дефекта заключается в том, что каждый элемент, который участвует в рабочем процессе, подвергается влиянию соседними элементами. Степень этого влияния обусловлена структурой системы и процесс поиска дефектов должен отслеживать эту взаимосвязь. Исследование причин возникновения отказов в процессе эксплуатации оборудования, а также

					<i>Анализ критериев надежности ГПА</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		30

классификация отказов по группам, являются важными этапами анализа надежности технических систем и их своевременной диагностики.

### **3.1.2 Основные периоды функционирования оборудования**

Для того чтобы правильно классифицировать типы отказов и оценить возможности их формирования необходимо разделить функционирования оборудования на три периода [3]:

- период приработки – как правило проходит при работе агрегата на холостом ходу с увеличением нагрузки постепенно для того, чтобы избежать повреждений в начальный период работы. В этот период наблюдается повышенная интенсивность отказов;
- период нормальной эксплуатации – в данный период снижается и стабилизируется интенсивность отказов. Время возникновения отказа не связывают с предыдущей наработкой изделия;
- период интенсивного износа элементов системы – в этот период наблюдается увеличение общего количества отказов.

### **3.1.3 Связь характера отказов с периодами функционирования оборудования**

Основываясь на производственном опыте, изменение интенсивности отказов функционально связанных элементов по времени для большинства узлов и агрегатов носит характер кривой.

					<i>Анализ критериев надежности ГПА</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		31



### 3.2 Анализ статистических данных отказов ГПА

Одним из наиболее значимых критериев надежности для ГПА является продолжительность его безотказной работы в течение установленного периода времени во всем диапазоне режимов работы.

Внезапные отказы представляют наибольшую опасность для ГПА, вследствие которых разрушение механической части агрегата и потеря его работоспособности происходит непредвиденно. Возникает необходимость аварийной остановки ГПА для того, чтобы снизить последствия разрушений и обезопасить персонал КС [3].

Появление отказов обычно связано с первичной неисправностью конструктивного или эксплуатационного характера и постепенным накоплением повреждений, снижающих работоспособность агрегата. Мгновенные и износные отказы представляют наибольший интерес при анализе надежности ГПА. Для научного обоснования сроков проведения объема ППР на станциях крайне необходимо знание видов износных отказов и характера их распределения. Снижению числа отказов в период нормальной эксплуатации способствует правильная организация планово-предупредительного ремонта. В периодах времени между ППР есть вероятность возникновения внезапных и иногда износных отказов, проявляющихся вследствие интенсивного износа, превышающего нормативные пределы. В период нормальной эксплуатации газоперекачивающего агрегата резкие изменения режимов его работы или несовершенства отдельных конструктивных элементов являются основными причинами возникновения отказов. Внезапные отказы возникают всегда случайно и не полностью невозможно их устранить, поэтому при анализе надежности КС этот вид отказов подвергается наиболее пристальному контролю. Такие отказы отдельных деталей агрегата, как правило, не зависят друг от друга.

Агрегаты подразделяются на механическую часть и систему автоматики.

					<i>Анализ критериев надежности ГПА</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		33



Количество классов зависит от того, насколько точно описаны все неисправные состояния, имеющие ясно выраженные признаки в виде характерного изменения параметров рабочего процесса.

В общем случае количество неисправных состояний и их классов бесконечно велико. Для того, чтобы сформулировать и решить задачи распознавания принимается допущение о том, что все неисправности можно объединить в конечное число классов, каждый из которых характеризуется конечным числом признаков. К определенному классу относятся неисправности одного наименования и вида.

Классифицировать неисправности ГПА можно по следующим признакам.

- Принадлежность к отдельным узлам.

- Влияние на работоспособность:

а) неисправности, которые приводят к снижению ресурса узлов и детали;

б) неисправности, которые приводят к изменению характеристик функционирования.

- Описывающие их признаки:

а) неисправности, диагностические параметры которых определяются прямым измерением;

б) неисправности, диагностируемые;

в) неисправности, оцениваемые по условиям, приводящим к их возникновению, определяются по косвенным признакам.

Неисправности элементов и узлов ГТД располагаются в следующей последовательности по убыванию частоты:

- рабочие лопатки, ротор, направляющие лопатки и диафрагма турбины;

- подшипники;

- камера сгорания и газоходы горячих газов;

- рабочие лопатки и ротор компрессора; направляющие лопатки компрессора;

- теплообменники и выходные газоходы;

- корпус и уплотнения;

					<i>Анализ критериев надежности ГПА</i>	<i>Лист</i>
						35
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

- вспомогательные устройства и системы;
- фундамент и прочие.

### 3.3.2 Анализ причин возникновения неисправностей ГПА

Лопатки осевого компрессора могут выходить из строя по ряду следующих причин:

- динамические напряжения, возникающие из-за усилий со стороны потока циклового воздуха и центробежных сил, которые действуют на всех режимах работы ГТД;
- низкая конструктивная надежность лопаточного аппарата;
- плохое состояние поверхности, нарушение посадки лопаток;
- несоблюдение технологического процесса при изготовлении.

Поломка лопаток влечет за собой нарушение устойчивой работы ОК и всего агрегата в целом. Иногда происходят разрушения пазов лопаток с их выбросом в проточную часть, что приводит к крупным поломкам.

Усталостные трещины чаще всего возникают на выходных кромках лопаток (реже на входных). В дальнейшем именно усталостные трещины приводят к разрушению лопаток осевого компрессора. При анализе технического состояния лопаточного аппарата может возникать ряд признаков, указывающих на разрушение металлических деталей осевого компрессора ГТУ. Ими являются: риски, задиры, вкрапления, обломы. Несоблюдение технологии изготовления приводит к нарушениям частотных характеристик лопаток ротора, статора, и, следовательно, к расширению диапазона резонансных режимов. Все это довольно часто приводит к образованию трещин и дальнейшим разрушениям. Также часто причиной появления трещин является срыв потока воздуха с появлением на концах лопаток вихрей, из-за которых возникают колебания лопаток, причем формы колебаний могут быть изгибно-крутильными или пластинчатыми в зависимости от частот резонансных колебаний. Поэтому

					<i>Анализ критериев надежности ГПА</i>	<i>Лист</i>
						36
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

при анализе состояния лопаток в качестве диагностического параметра рассматривают максимальное напряжение и амплитуду напряжений. [3]

Основные причины, которые влияют на разброс напряжения в пределах проточной части ОК, носят конструктивно-производственный и эксплуатационный характер.

Конструктивно-производственными являются случайные отклонения в геометрии профиля, в технологии изготовления, регулирования, к эксплуатационным относятся: неравномерность воздушного потока при отклонениях рабочих режимов; различная наработка отдельных лопаток, вследствие этого, разный их износ. Довольно часто разрушения лопаток возникают в результате эрозионного износа. На износ также оказывают влияние взаимное расположение направляющих и рабочих лопаток ротора и статора и характер механических примесей. К тому же больше всего этому виду износа подвержены входная и выходная кромка, верхняя часть рабочих лопаток и лопатки направляющего аппарата.

Разрушение лопаток осевого компрессора связано с высоким уровнем динамических нагрузок, вызванных потоками циклового воздуха и неустойчивостью работы ОК.

При постоянной частоте вращения ротора и неустойчивой работе наблюдается уменьшение расхода циклового воздуха и увеличение степени повышения давления. На неустойчивую работу компрессора оказывает влияние ряд следующих эксплуатационных факторов:

- повышение сопротивления всасывающего тракта в результате загрязнения фильтров;
- эрозионный износ лопаток, трещины и обрыв направляющих и рабочих лопаток, что снижает КПД компрессора неудовлетворительное состояние проточной части из-за загрязнения лопаточного аппарата, т. е. увеличение сопротивления[3].

Потеря устойчивости, помпаж проявляются в повышении температуры перед турбиной, уменьшении частоты вращения, повышении расхода

					<i>Анализ критериев надежности ГПА</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		37

топливного газа, а также в повышении уровня вибрации ротора турбокомпрессора и всего агрегата.

Причинами возникновения неисправностей дисков турбин являются:

- неправильная их сборка;
- низкое качество поковок и механической обработки;
- коррозия поверхности;
- плохой контроль диска после его изготовления
- перегрев во время работы.

Состояние лопаток и диска турбины связано с влиянием высоких температур, которые вызывают прогары и коробление в корпусе турбин, трещины в дисках ротора турбины, трещины и обрыв рабочих и сопловых лопаток, что связано с изменением политропического коэффициента полезного действия турбины и площади соплового аппарата. Основными неисправностями также являются увеличение утечек в газоздушном тракте высокого давления в результате разрушения лабиринтных уплотнений, и загрязнения газоздушного тракта и изменения его геометрии, что связано с изменением гидравлического сопротивления. [3]

Основные неисправности камеры сгорания, встречающиеся в эксплуатации:

- трещины и прогар жаровых труб термического происхождения в результате нагарообразования на стенах труб и рабочих форсунок, что связано с неполным сгоранием топлива, и способствует значительной нестабильностью температурного поля перед ТВД;
- загрязнение фильтров и закоксованность горелок, вызывающее уменьшение расхода топлива и изменение температуры рабочего тела после камеры сгорания.

Причиной вторичных разрушений дисков и лопаток турбины могут быть разрушения в камере сгорания.

Основными причинами выхода из строя подшипников опор являются:

- изменение зазоров и посадок;

					<i>Анализ критериев надежности ГПА</i>	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- использование материала с дефектами;
- нарушение технологии изготовления и монтажа детали и узлов опор;
- условия работы подшипника;
- срыв масляного клина или хотя бы кратковременное нарушение подачи масла в опору

Все перечисленные причины приводят к усталостным режимам.

Зазор изменяется в результате перепадов температур во время запуска двигателя при низких температурах, а также при проворачивании колец на валу или корпусе из-за нарушений технологии сборки. Уменьшение подачи масла к подвижным частям подшипника, может вызвать оплавление его внешней поверхности и гнезда. Если подача смазки ниже требуемого объема или ее подача периодически нарушается беговые дорожки имеют приработанную, гладко укатанную поверхность с завальцо-ванными краями, а наплавленный слой имеет гладкую поверхность и равное распределение толщины по всей поверхности беговых дорожек. В этом случае происходит повышение температуры поверхностей тел качения, вследствие чего зазор уменьшается и может произойти заклинивание и скольжение по беговой дорожке. Это приводит к оплавлению материала тел качения и его налипанию на беговые дорожки, материал колец подвергается усиленному износу, оплавляются и изнашиваются гнезда под тела качения. Основываясь на производственном опыте, полученном при эксплуатации ГПА, в первую очередь разрушается подшипник средней опоры, располагающийся в зоне повышенных температур. Передние и задние подшипники, как правило, разрушаются в результате длительной работы турбины при недостаточной подачи масла. Разрушение средней опоры приводит к смещению ротора в осевом направлении, выбору зазора между деталями ротора и корпуса. Вследствие этого начинается интенсивное изнашивание деталей ротора и корпуса, а также возникает резкое снижение скорости вращения ротора из-за соприкосновения его лопаток и лопаток направляющего аппарата с

					<i>Анализ критериев надежности ГПА</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		39

последующим помпажем и заклиниванием ротора. При работе на критических режимах ротор ГТУ может быть поврежден в результате появления повышенного уровня вибрации при резонансных колебаниях. Это приводит к возникновению трещин на силовых стойках элементов корпуса, одностороннему износу опор, разрушению подшипников, деформации вала, заклиниванию ротора и др.

Ухудшение состояния регенератора связано с повышением сопротивления тракта низкого давления, а также с ростом утечек рабочего тела через неплотности теплообменных поверхностей.

Неисправности в системах смазки, охлаждения, регулирования, КИПиА, подача топливного газа также являются причинами аварийных ситуаций и отказа оборудования.

Основной дефект ротора ТВД - повышенное торцевое биение, которое приводит к неуравновешенности ротора, а, вследствие этого, к повышенной вибрации. Данный дефект возникает на роторах, отремонтированных на заводе. Из этого следует, что появление торцевого повторного биения объясняется неудовлетворительной технологией восстановительных работ. Первоначальное торцевое биение возникает вследствие действия переменных сил при задевании лопаток [3].

В ходе продолжительной эксплуатации возникает постепенное ухудшение физических и механических свойств материала, нарушение соединений отдельных узлов и деталей, рост статических, динамических, термических напряжений в элементах агрегатов. При этом возникают такие процессы как старение, износ, коробление, растрескивание материалов. Элементы агрегата приходят в неисправное состояние. Несмотря на то, что агрегат сохраняет работоспособность, вызванное этими процессами состояние классифицируется как постепенный отказ. Причиной появления постепенных отказов является длительная эксплуатация агрегатов. Результаты постепенных отказов проявляются в снижении технических показателей этих агрегатов.

					<i>Анализ критериев надежности ГПА</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		40

Постепенные отказы вызывают снижение мощности и КПД ГПА, повышении затрат на восстановление его работоспособности, повышении вероятности появления аварийных ситуаций. Главной опасностью для ГПА являются внезапные отказы, вследствие чего происходит разрушение механической части агрегата и снижение его работоспособности. Данную проблему возможно решить только аварийной остановкой ГПА с целью уменьшения последствий разрушений и обеспечения безопасности рабочего персонала КС.

Основными напряженными элементами ГПА с газотурбинным приводом являются: осевой компрессор, камера сгорания и турбина. Детали агрегатов подвержены действию высоких динамических, статических и тепловых нагрузок. Безотказная работа деталей определяет надежность механической части агрегатов в целом. Надежность ОК определяется надежностью лопаточного аппарата. Наибольшее воздействие на лопаточный аппарат ОК вызывают динамические усилия, вызываемые потоком циклового воздуха и центробежными силами от массы компрессора, воздействие которых постоянно при всех режимах работы ГПА.

Надежность турбины определяется работоспособностью диска ТВД и аппарата лопаток, на которые действуют различные нагрузки. Наиболее благоприятный по температуре для диска ТВД – пусковой режим. При запуске агрегата возникают повышенные термические напряжения. В сочетании с напряжениями от центробежных сил высокие термические напряжения могут существенно ухудшить состояние узла посадки диска на вал и привести к перегрузке штифтов.

Аварийная остановка агрегата является наиболее опасным режимом для лопаток турбины. Камера сгорания отключается и резко снижается температура потока. Значительная неравномерность температурного поля приводит к возникновению высоких напряжений растяжения, складывающиеся с напряжением от центробежных сил.

					<i>Анализ критериев надежности ГПА</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		41

Работоспособность камеры сгорания оказывает существенное влияние на надежность ГПА, так как повреждение ее элементов приводит к вынужденным остановкам, а неудовлетворительная организация горения снижает время эксплуатации лопаток турбины. Основные элементы камеры сгорания (жаровая труба, экран, смеситель, фронтное устройство и пламеперекидной патрубок) работают при высоких температурах и подвержены влиянию пульсаций потока продуктов сгорания [3].

Важнейшим фактором, определяющим работоспособность ГПА, является уровень вибрации опорных систем ОК и турбины.

					<i>Анализ критериев надежности ГПА</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		42

## 4. АНАЛИЗ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГПА

### 4.1 Характеристика технического состояния ГПА

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 виды технических состояний подразделяются на:

«Исправное - состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации;

Неисправное - состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации;

Работоспособное - состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации;

Неработоспособное - состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации;

Предельное состояние - состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно».

Определение принадлежности технического состояния к тому или иному виду становится возможным, если есть информация о ряде показателей:

- конфигурации технической системы в целом и ее элементов в частности;
- требованиях и оптимальных параметрах функционирования системы, заданные в технической документации;
- предельно-допустимых значениях функциональных параметров;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Определение показателей надежности газоперекачивающего агрегата с газотурбинным двигателем		
Разраб.		Тян В. Д.			Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Рудаченко А. В.				43	92
Консульт.					НИ ТПУ гр. 2Б4А		
Рук-ль ООП		Брусник О.В.					
					Анализ методов неразрушающего технического состояния ГПА		

- эталонных характеристиках конкретного агрегата, полученные экспериментальным путем;
- действительном техническом состоянии как системы в целом, так и отдельных ее элементов, выявленное доступными методами диагностирования.

## **4.2 Методы неразрушающего контроля технического состояния ГПА**

### **4.2.1 Метод трибодиагностики**

Опыт эксплуатации ГТД в России и в мире свидетельствует о значительном количестве отказов двигателей в связи с выходом из строя смазываемых узлов трения. Это обуславливает важную роль, которую играет трибодиагностика. Частицы изнашиваемых металлов образуются в результате взаимного перемещения металлических деталей в механических системах, несмотря на наличие смазки. Такое перемещение сопровождается трением и постоянным износом контактирующих поверхностей. Металлические частицы истираемого материала попадают в масляную систему. Следовательно, в масло переходят частицы износа сплавов и покрытий, применяемых для изготовления трущихся деталей и узлов маслосистемы, а также атмосферной пыли. В масле появляется потенциальный источник информации, который непосредственно свидетельствует о состоянии данного узла. Трибодиагностика подразделяется на два основных вида – бортовую и лабораторную. Бортовую трибодиагностику применяют для предупреждения о дефекте узлов трения во время работы двигателя за небольшой период времени до возникновения опасности их разрушения, то есть является средством контроля состояния. Лабораторная диагностика предназначена для долгосрочного прогнозирования дефекта и определения его местоположения в двигателе. В качестве бортовых средств трибодиагностики чаще всего применяются магнитные пробки, сигнализаторы стружки в масле и фильтры-сигнализаторы. В последнее время все большее

					<i>Анализ методов неразрушающего технического состояния ГПА</i>	<i>Лист</i>
						44
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

применение находят автоматизированные системы предупреждения аварийного износа, основанные на различных физических принципах [11].



Рисунок 2 – Отложение стружки на магнитной пробке

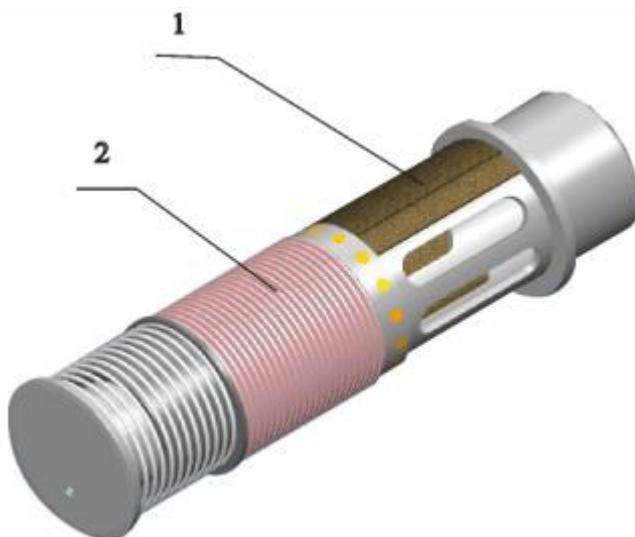


Рисунок 3 – Вставка фильтра-сигнализатора

1 – сетка; 2 - секции

При лабораторной трибодиагностике проводится спектральный анализ

проб масла, феррографический анализ, гранулометрический анализ, а также определяется марка материала продуктов износа - стружки. В процессе спектрального анализа определяется концентрация металлов в масле. Как правило, определяется содержание меди, железа, реже серебра. Современные приборы для спектрального анализа позволяют контролировать более 20 элементов. При феррографическом анализе определяются размеры, форма и количество крупных частиц в масле, по которым можно составить картину характера повреждения трущихся поверхностей. При гранулометрическом анализе определяется общая загрязненность масла любыми частицами с определением их размеров и количества, и соответствие нормируемому классу чистоты масла.

#### 4.2.2 Вибрационная диагностика ГТД

Вибрации ГТД измеряют при испытаниях двигателей и при эксплуатации. При этом вибрация двигателя рассматривается с двух точек зрения. С одной стороны, высокий уровень вибрации может стать причиной усталостных поломок элементов конструкции двигателя и размещенных на нем агрегатов и обвязки. По этой причине должен быть определен допустимый уровень вибрации, с превышением которого работа двигателя не допускается. С другой стороны, повышение или изменение вибрации может рассматриваться как признак появившейся или развивающейся неисправности какого-либо узла двигателя. В этой связи разрабатываются методы вибрационной диагностики - методы, позволяющие по характеру изменения вибрации определить тип неисправности двигателя.

Допустимые уровни вибрации и общие требования к контролю вибрации двигателей определяются нормативными документами. При определении вибрационных характеристик двигателя в опытном производстве проводят подробное вибрографирование, при котором датчики вибрации

					<i>Анализ методов неразрушающего технического состояния ГПА</i>	<i>Лист</i>
						46
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

(вибропреобразователи) устанавливаются на корпусах двигателя в плоскостях расположения опор роторов, имеющих непосредственную связь с корпусом.

По результатам вибрографирований двигателя, выполненных в процессе доводки и на этапе освоения серийного производства, определяются виброхарактеристики двигателя - зависимости амплитуды вибро смещения, вибро скорости или вибро ускорения от частот вращения ротора. Уточняются штатные места расположения вибропреобразователей, по которым в дальнейшем будет контролироваться вибрация, назначаются диапазоны частот вращения роторов для проведения эффективного контроля вибрационного состояния двигателя на приемо-сдаточных испытаниях, при длительных стендовых испытаниях и в эксплуатации.

При определении размещения штатных вибропреобразователей необходимо стремиться к тому чтобы вибрация в этих точках была наиболее четко связана с возбуждающими силами и имела наиболее характерный для двигателя спектральный состав (причем величина вибрации при этом не обязательно должна быть самой максимальной). Крепление вибропреобразователей к корпусу должно быть таким, чтобы собственная частота вибропреобразователя, размещенного на корпусе, лежала вне исследуемого диапазона частот вибрации.

Для эксплуатационных условий допустимый уровень вибрации назначается, исходя из требования обеспечения динамической прочности элементов конструкции двигателя. В качестве нормы принимаются такие значения вибрации, при которых достаточно мала вероятность вибрационных дефектов, а меры обеспечения заданной нормы остаются приемлемыми для конструкции, технологии и эксплуатации [11].

#### *Датчики измерения вибрации*

В зависимости от того в какой размерности измеряет вибрацию двигателя каждый конкретный датчик вибрации их подразделяют на два основных типа, которые различаются по конструкции и особенностям применения:

					<i>Анализ методов неразрушающего технического состояния ГПА</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		47

-датчики виброскорости;  
-датчики виброускорения, наиболее распространенные в настоящее время. Основные характеристики датчиков вибрации:

- частотный диапазон;
- чувствительность;
- чувствительность в поперечном направлении;
- собственная резонансная частота.

#### *Датчики виброскорости*

Классический датчик виброскорости представляет из себя сильный кольцевой магнит, в зазоре которого перемещается катушка, связанная с инерционной массой. Такие датчики вибрации еще называют индукционными датчиками..

Достоинство - простота и стабильность основных параметров.

Недостатки:

- ограниченный диапазон частот - от 10 до 1000 гц;
- большая масса постоянного магнита и, соответственно, датчика.

В настоящее время практически не применяются.

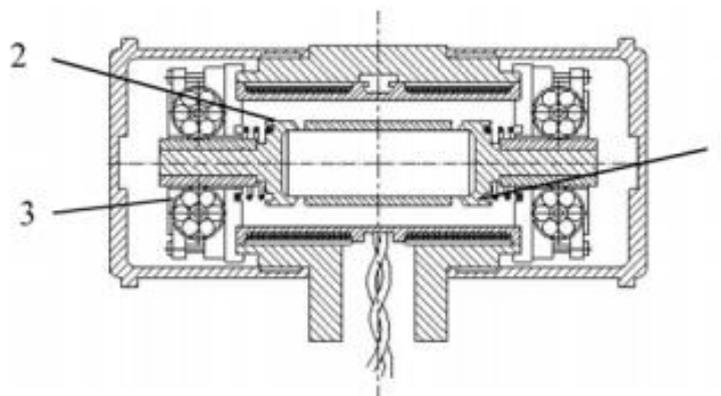


Рисунок 4 – Устройство индукционного вибродатчика

1 – кольцевой магнит; 2 – масса; 3 – катушка индуктивности

#### *Датчики виброускорения*

					Анализ методов неразрушающего технического состояния ГПА	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

В настоящее время данный вид вибродатчика наиболее распространенный. По принципу действия и конструкции они делятся на пьезоэлектрические акселерометры и емкостные датчики вибрации.

1) Пьезоэлектрический акселерометр.

Конструктивно пьезоакселерометр представляет из себя пьезокристалл, к которому прикреплена сверху небольшая фиксированная масса.

Вибрации двигателя передаются на корпус вибродатчика, он перемещается вместе с кристаллом. Масса, закрепленная на кристалле, оказывает воздействие на кристалл с некой силой, которая пропорциональна произведению ускорения на величину этой массы. Под действием инерционной силы происходит деформация пьезокристалла и на его обкладках генерируется электрический заряд, пропорциональный виброускорению корпуса двигателя.

Достоинства пьезоакселерометров:

- широкий диапазон частот;
- малый вес;
- большая чувствительность.

Недостатки:

- ограниченный диапазон частот;
- нельзя применять без проверки резонансных свойств;
- относительно высокая стоимость.

В настоящее время появились трехкоординатные датчики, в корпусе которого устанавливаются три пьезокристалла, ориентированных в разных осях. Обычно трехкоординатные датчики используются для систем стационарного вибрационного мониторинга.

В некоторых типах пьезоакселерометров имеется встроенный усилитель заряда. Если усилитель заряда встроенный - то не возникает проблем с длиной кабеля, которым датчик подключается к прибору. Если усилитель заряда

					<i>Анализ методов неразрушающего технического состояния ГПА</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		49

отсутствует, то к соединительному кабелю от датчика предъявляются очень жесткие требования, стоимость его значительна.

## 2) Емкостные датчики вибрации.

Распространение таких датчиков только начинается.

Устройство датчиков такого типа, принцип действия, достаточно просты. На кристалле микросхемы методом микроэлектроники формируется упруго перемещаемые элементы. При перемещении этих элементов под воздействием внешних ускорений происходят изменения расстояний до неподвижных электродов, которые выполняют функции электродов конденсатора. Данные электроды входят в состав колебательного контура генератора, базирующегося на том же кристалле микросхемы. Затем происходит преобразование сигнала с переменной частотой преобразуется в переменное выходное напряжение. Размеры такого датчика малы. Достоинства:

- возможность регистрации сверхнизкочастотных вибраций, практически с 0 Гц;

- высокая чувствительность (может регистрировать даже ускорение свободного падения);

- при «перевороте» датчика напряжение на его выходе меняет свой знак.

Недостатки:

- низкая рабочая граница в области высоких частот, обычно от 200 до 1000 Гц; - сложность градуировки.

					<i>Анализ методов неразрушающего технического состояния ГПА</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		50

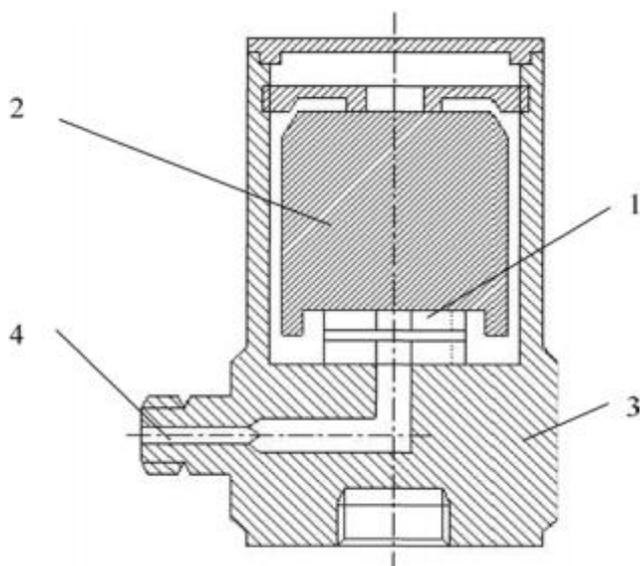


Рисунок 5 – Устройство пьезоэлектрического акселерометра  
 1 – пьезокристалл; 2 – масса; 3 – корпус вибродатчика; 4 –  
 электрический разъем

#### 4.2.3 Параметрическая диагностика

В условиях компрессорных станций в настоящее время заложена постоянно действующая система замера параметров работающих агрегатов по ГТУ и центробежному компрессору. На станциях периодически измеряют параметры рабочего тела  $P$ ,  $T$  по тракту ГТУ, параметры  $P$ ,  $T$  по тракту нагнетателя, параметры окружающей среды.

Техническое состояние ГПА существенным образом сказывается на всей технологии транспортировки газа по магистральному газопроводу. Можно всегда утверждать, что если при данном расходе топливного газа снизилась производительность компрессора, то при прочих равных условиях это могло произойти из-за технического состояния ГТУ, компрессора или то и другое вместе.

Метод параметрической диагностики заключается в определении изменения параметров технического состояния агрегата или его отдельных элементов по изменению его технологических и топливо-энергетических показателей – производительности, мощности, КПД привода и компрессора в процессе эксплуатации.

Техническое состояние ГПА или отдельных его деталей судят по изменению их рабочих параметров. Само изменение обычно оценивается сравнением различных характеристик, построенных для данного момента, и для времени, принятого за исходное. В качестве исходного обычно принимают время проведения стендовых, сдаточных или других видов испытаний агрегата. Соответствие характеристик агрегата паспортным значениям будет говорить о его исправном техническом состоянии; отклонение этих характеристик от эталонных будет свидетельствовать об изменениях, происходящих в ГПА.

Для количественных оценок отклонений характеристик ГТУ применяются коэффициенты технического состояния по мощности и топливному газу.

Коэффициент технического состояния по мощности вычисляется по формуле:

$$k_{Ne} = \frac{N_{e(пр)t(ТВД0)}}{N_e^0}, \quad (0 < k_{Ne} \leq 1), \quad (20)$$

где  $N_e^0$  – номинальная мощность агрегата, кВт;

$N_{e(пр)t(ТВД0)}$  – приведенная мощность агрегата, кВт, определяется по формуле:

$$N_{e(пр)t(ТВД0)} = N_{e(пр)} + \Delta N_{e(пр)} \quad (21)$$

где  $N_{e(пр)}$  – приведенная мощность на валу ГТУ (к 15 °С и 0,1013 МПа) вычисляется по формуле:

$$N_{e(пр)} = N_e \cdot \frac{0,1013}{P_a} \cdot \sqrt{\frac{288,15}{T_{вх}}} \quad (22)$$

$\Delta N_{e(пр)}$  – поправка для приведения мощности к номинальной температуре на входе ТВД, определяется по формуле:

$$\Delta N_{e(пр)} = K_{t1} \cdot (t_{ТВД0} - t_{ТВД(пр)}) \quad (23)$$

где  $K_{t1}$  – поправочный коэффициент, кВт/°С;

					Анализ методов неразрушающего технического состояния ГПА	Лист
						52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$t_{\text{ТВД}0}$  – номинальное значение температуры на входе в турбину высокого давления, °С;

$t_{\text{ТВД(пр)}}$  – приведенная температура газов на входе в ТВД, °С, определяется по формуле:

$$t_{\text{ТВД(пр)}} = (t_{\text{ТВД}} + 273,15) \cdot \frac{288,15}{T_{\text{ВХ}}} - 273,15 \quad (24)$$

Коэффициент технического состояния по топливному газу вычисляется по формуле:

$$k_{\text{ТГ}} = \frac{q_{\text{ТГ(пр)}}}{q_{\text{ТГ}0}} \quad (25)$$

где  $q_{\text{ТГ}0}$  – номинальное значение расхода топливного газа (при номинальной мощности);

$q_{\text{ТГ(пр)}}$  – фактический приведенный расход топливного газа, определяется по формуле:

$$q_{\text{ТГ(пр)}} = q_{\text{ТГ}} \cdot \frac{0,1013}{P_a} \cdot \sqrt{\frac{288,15}{T_{\text{ВХ}}}} \cdot \frac{Q_{\text{НР}}}{Q_{\text{НР}0}} \quad (26)$$

где  $Q_{\text{НР}0}$  – номинальная низшая теплота сгорания топливного газа (принимается равной 8000 ккал/м<sup>3</sup>);

$Q_{\text{НР}}$  – фактическая низшая теплота сгорания топливного газа, ккал/м<sup>3</sup>.

### 4.3 Обеспечение диагностирования ГТД инструментальными методами

К настоящему времени определились наиболее часто применяемые инструментальные методы диагностирования, широко использующие средства неразрушающего контроля: визуально-измерительные методы с применением эндоскопов, ультразвуковые методы и электромагнитные методы. При эксплуатации ГТД применяются все вышеперечисленные методы, эти методы позволяют быстро и без больших затрат определять техническое состояние наиболее нагруженных деталей ГТД и надежно проводить их диагностирование.

					Анализ методов неразрушающего технического состояния ГПА	Лист
						53
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Также существуют такие методы как: магнитопорошковый и рентгеновский, но их в наше время практически не используют.

Методы инструментального диагностирования позволяют оценивать состояние деталей и узлов двигателя на остановленном (холодном).

Данные методы диагностирования предназначены для выявления повреждений (дефектов) в виде деформаций, сколов, трещин, в том числе внутренних, прогаров, следов эрозионного износа и коррозии, забоин, погнутостей ГТД. Практически все методы являются прямыми методами обнаружения, т.е. дают достоверную и окончательную информацию о наличии или отсутствии дефекта. Обычно дефекты, которые обнаруживаются инструментальными методами, невозможно выявить иначе[11].

#### 4.3.1 Визуально-измерительный метод диагностирования

Визуально-измерительный метод дает возможность выполнять осмотр газоздушного тракта и внутренних полостей двигателя, коробок приводов, межвального пространства, недоступных для обычного визуального осмотра и фотографирования узлов агрегата. Данную операцию позволяют проводить специальные приборы – эндоскопы.

Современные технические волоконные эндоскопы состоят из следующих элементов:

- информационный и осветительный светодиоды, заключенных в жесткую или гибкую оболочку;
- рабочая часть;
- оптические устройства (окуляра и объектива);
- система управления дистальной (поворотной) частью;
- блок питания с мощным галогенным источником света.

Для исследования того или иного объекта с помощью эндоскопа рабочая часть прибора погружается во внутренние полости объекта исследования. Инфо-

					<i>Анализ методов неразрушающего технического состояния ГПА</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		54

рмация в виде видеоизображения передается от объективной части через информационный светодиод и выводится на оптической окулярной части прибора. Эндоскопы бывают жесткими и гибкими. Рабочая часть жестких эндоскопов обычно представляет собой цилиндрическую трубку. У гибких, рабочая часть позволяет менять направление наблюдения и имеет органы управления дистальной частью в одной, реже в двух взаимно перпендикулярных плоскостях наблюдения.

Жесткие эндоскопы значительно надежнее гибких за счет своей простоты в конструкции. Их применение целесообразно при регулярном осмотре деталей и при заранее заданной прямолинейной траектории ввода световода. Жесткие эндоскопы в основном применяют для анализа состояния элементов роторных деталей: дефлекторов, дисков, рабочих лопаток и т.д.

Для осмотра деталей, доступ к которым сильно затруднен, целесообразно применение гибких эндоскопов. Также данный тип эндоскопов позволяет найти дефект, местоположение которого заранее неизвестно. Эндоскопы данного типа являются фактически единственным средством для анализа состояния сопловых лопаток турбины, направляющих лопаток компрессора и лопаток статорных венцов[11].

#### 4.3.2 Ультразвуковой метод диагностирования

Ультразвуковой метод основан на регистрации ультразвуковых волн (импульсов), отраженных от поверхностных или скрытых в глубине материала различного рода дефектов. Импульсы посылаются в объекты диагностирования, отражаются и принимаются специальными пьезоэлектрическими преобразователями.

Для точного позиционирования ПЭП служат специальные приспособления для их доставки через лючки. Приспособления обычно включают в себя средства фиксации, элементы масляной системы для

					<i>Анализ методов неразрушающего технического состояния ГПА</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		55

обеспечения надежного акустического контакта и систему контроля этого контакта.

Ультразвуковому диагностированию подвергаются кромки рабочих лопаток компрессора и турбины, межпазовые выступы дисков КНД и вентилятора, проушины шарнирных рабочих лопаток компрессора, диски КВД, болты крепления лабиринтов и т.п.

### 4.3.3 Вихретоковый метод диагностирования

Сущность метода состоит в реакции переменного электромагнитного поля на наличие трещины или другого дефекта в исследуемом объекте. Электромагнитное поле наводится переменными электромагнитными импульсами генератора дефектоскопа. Импульсы передаются в объект в виде вихревых токов от преобразователя, состоящего из индукционной катушки и ферромагнитного сердечника. Размеры миниатюрной катушки с сердечником могут быть менее 3 мм. Привлекает простота настройки дефектоскопа и небольшие размеры преобразователей, которые легко изготавливаются даже в условиях серийного производства ГТД. Вихретоковый метод широко используется для диагностирования состояния кромок турбинных лопаток, дефлекторов и дисков турбины.

Принцип работы вихретокового дефектоскопа: дефектоскоп обрабатывает электрический сигнал от преобразователя, подводимого к исследуемому участку с помощью средства доставки, и обеспечивает пропорциональное отклонение стрелки индикатора, а также выдает акустический сигнал на наушники[11].

					<i>Анализ методов неразрушающего технического состояния ГПА</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		56

## 5 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ВИДЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ГПА

Под понятием ТО агрегата понимается вся совокупность мероприятий, служащих для обеспечения номинальных рабочих характеристик ГПА, текущего обслуживания ГПА, контроля его работоспособности и диагностики отказов, а также проведение ремонтно-восстановительных работ.

На КС действует регламент ТО (РТМ 108.022.105-77), который предусматривает проведение комплекса работ по поддержанию ГПА в работоспособном состоянии в течение установленного заводом-изготовителем моторесурса.

Регламент предусматривает проведение следующих видов работ:

- ТО работающего (ТО 1-3) или находящегося в резерве (ТО 1-5) агрегата, которое включает технический осмотр, проверку состояния, контроль и измерение рабочих параметров и другие виды работ в зависимости от времени наработки или нахождения ГПА в резерве;
- ревизия камеры сгорания и нагнетателя (ТО-4);
- средний и капитальный ремонты.

Техническое обслуживание при использовании ГПА:

- ежедневное ТО;
- ТО через 700 часов наработки;
- ТО через 2000 часов наработки;
- ТО через 4000 (6000) часов наработки.

					<i>Определение показателей надежности газоперекачивающего агрегата с газотурбинным двигателем</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Тян В. Д.</i>			<i>Основные положения и виды технического обслуживания ГПА</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		<i>Рудаченко А. В.</i>					57	92
<i>Консульт.</i>						<i>НИ ТПУ гр. 2Б4А</i>		
<i>Рук-ль ООП</i>		<i>Брусник О.В.</i>						

## 5.1 Основные формы технического обслуживания оборудования

На сегодняшний день известны четыре основных формы технического обслуживания оборудования. Каждый из подходов имеет свои достоинства и недостатки.

### 1. Обслуживание до отказа;

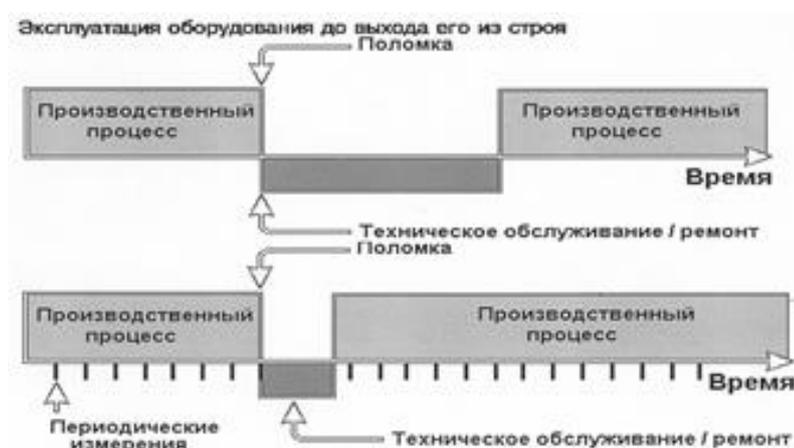


Рисунок 6 – Обслуживание до отказа

Достоинства:

- не предъявляются высокие требования к обслуживающему персоналу;
- межремонтный интервал оборудования может быть выше по сравнению с планово-предупредительным ремонтом (ППР).

Недостатки:

- невозможность планирования сроков ремонтов;
- велика вероятность возникновения обширных разрушений и длительного ремонта;
- необходимость большого количества материально-производственных частей.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

## 2. Система планово-предупредительных ремонтов (ППР);

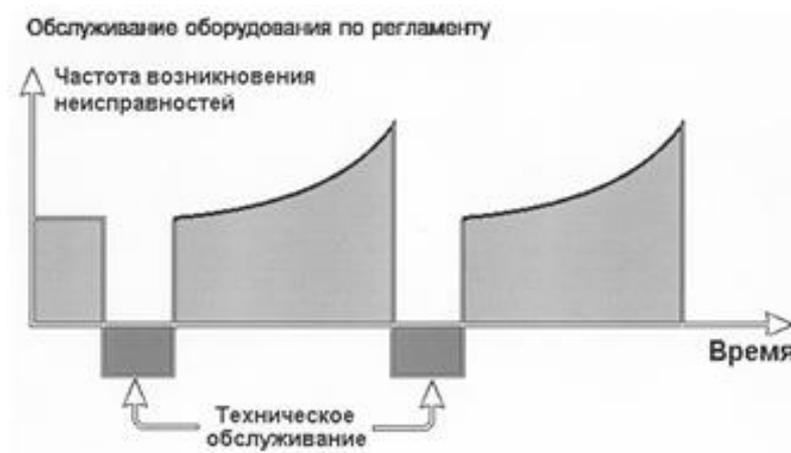


Рисунок 7 – Система планово-предупредительных ремонтов

Достоинства:

- может быть использовано для периодически работающего оборудования.

Недостатки:

- может произойти раньше или позже фактически необходимого;
- может быть причиной ухудшения работы (дефекты изготовления и монтажа).

## 3. Техническое обслуживание по фактическому состоянию (ТО по ФС);

Достоинства:

- увеличение производительности за счет исключения аварийных ситуаций и необоснованных простоев оборудования;
- планирование ремонтных работ позволяет существенно экономить средства и время;
- постоянный мониторинг.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

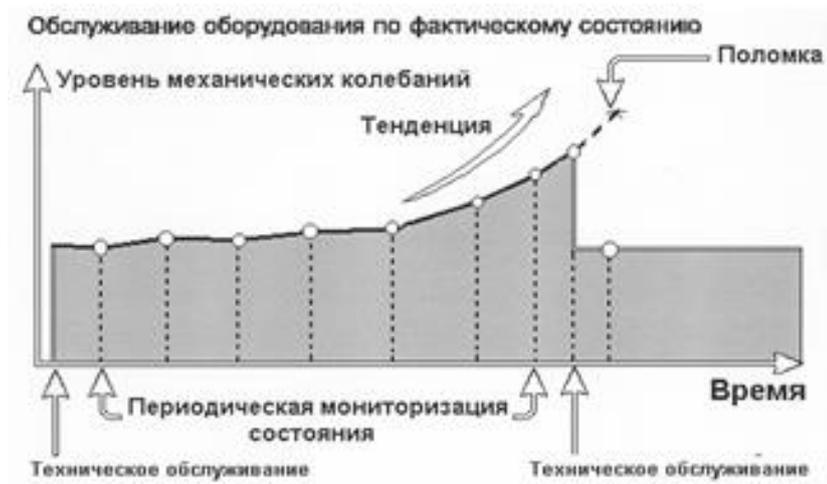


Рисунок 8 – ТО по фактическому состоянию

Трудности:

- высокая квалификация персонала (как эксплуатационного, так и вибродиагностов);
- согласованное взаимодействие различных служб (эксплуатация, ремонтников, группа вибродиагностов).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

## 6 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

### 6.1 Расчет термогазодинамических параметров ГТУ

Таблица 2 – Состав и характеристика компонентов природного газа

Характеристики	Компоненты						
	$r_{CH4}$	$r_{C2H6}$	$r_{C3H8}$	$r_{C4H10}$	$r_{CO2}$	$r_{H2S}$	$r_{N2}$
	$r_{C1}$	$r_{C2}$	$r_{C3}$	$r_{C4}$			
Молярная концентрация $r$ , %	96,0	2,0	1,0	0,05	0,15	0,1	0,7
Молекулярный вес $\mu_i$ , кг/кмоль	16,04	30,07	44,09	58,12	44,02	34,02	28
Низшая теплота сгорания $Q_{Hi}^P$ , кДж/кг	49933	47415	46302	47327	-	21750	-

Таблица 3 – Общие исходные данные по ТГП ГТК-10-4

Обозначение	Расшифровка	Значения	Единица изм.
$\rho_{15}$	нормальная плотность воздуха	1,226	кг/м <sup>3</sup>
$P_a$	атмосферное давление воздуха	0,0985	МПа
$T_a$	температура наружного воздуха	294	К

					<i>Определение показателей надежности газоперекачивающего агрегата с газотурбинным двигателем</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		Тян В. Д.			<i>Расчетная часть</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		Рудаченко А. В.					61	92
<i>Консульт.</i>						<i>НИ ТПУ гр. 2Б4А</i>		
<i>Рук-ль ООП</i>		Брусник О.В.						

Продолжение таблицы 3

$T_C$	температура воздуха до регенератора	450	К
$T_V$	температура воздуха после регенератора	600	К
$P_Z$	Абсолютное давление продуктов сгорания после ТНД	0,3513	МПа
$T_S$	абсолютные температура продуктов сгорания после ТНД	900	К
$P_{изб}$	избыточное давление воздуха	0,00250	МПа
$\Delta P_{П}$	перепад давления в правом проходе	$4,162 \cdot 10^{-4}$	МПа
$\Delta P_{Л}$	перепад давления в левом проходе	$4,132 \cdot 10^{-4}$	МПа
$B$	массовый расход топливного газа	0,78	кг/с
$F_{П}$	Площадь поперечного сечения правого выхлопного газохода	1,826	м <sup>2</sup>
$F_{Л}$	Площадь поперечного сечения левого выхлопного газохода	1,826	м <sup>2</sup>

**Решение:**

Рассчитываем характеристики газа по следующим уравнениям:

– молярная масса:

$$\mu_m = \frac{1}{100} \cdot \sum r_i \cdot \mu_i; \quad (27)$$

$$\mu_m = \frac{1}{100} \cdot (96,0 \cdot 16,04 + 2,0 \cdot 30,07 + 1,0 \cdot 44,09 + 0,05 \cdot 58,12 + 0,15 \cdot 44,02 + 0,1 \cdot 34,02 + 0,7 \cdot 28) = 16,766 \text{ кг/кмоль};$$

– весовая горючая концентрация элементов топлива:

$$C^{\Gamma} = \frac{12,01}{\mu_m} \cdot (r_{C_1} + 2 \cdot r_{C_2} + 3 \cdot r_{C_3} + 4 \cdot r_{C_4} + r_{CO_2}); \quad (28)$$

$$C^{\Gamma} = \frac{12,01}{16,766} \cdot (96 + 2 \cdot 2,0 + 3 \cdot 1,0 + 4 \cdot 0,05 + 0,15) = 74,033\%;$$

$$H^{\Gamma} = \frac{1,008}{\mu_m} \cdot (4 \cdot r_{C_1} + 6 \cdot r_{C_2} + 8 \cdot r_{C_3} + 10 \cdot r_{C_4}); \quad (29)$$

$$H^{\Gamma} = \frac{1,008}{16,766} \cdot (4 \cdot 96 + 6 \cdot 2,0 + 8 \cdot 1,0 + 10 \cdot 0,05) = 24,319\%;$$

$$S^{\Gamma} = \frac{32,06}{\mu_m} \cdot r_{H_2S}; \quad (30)$$

$$S^{\Gamma} = \frac{32,06}{16,766} \cdot 0,1 = 0,192\%;$$

$$N^{\Gamma} = \frac{14,008}{\mu_m} \cdot 2 \cdot r_{N_2}; \quad (31)$$

$$N^{\Gamma} = \frac{14,008}{16,766} \cdot 2 \cdot 0,7 = 1,170\%;$$

$$O^{\Gamma} = \frac{16}{\mu_m} \cdot 2 \cdot r_{CO_2}; \quad (32)$$

$$O^{\Gamma} = \frac{16}{16,766} \cdot 2 \cdot 0,15 = 0,286\%;$$

					Расчетная часть	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

Проверка:

$$C^r + H^r + S^r + N^r + O^r = 100\%; \quad (33)$$

$$74,033 + 24,319 + 0,192 + 1,170 + 0,286 = 100\%;$$

– характеристика элементарного состава топлива:

$$E = 2,979 \cdot \frac{H^r - 0,126 \cdot O^r}{C^r + 0,375 \cdot S^r}; \quad (34)$$

$$E = 2,979 \cdot \frac{24,319 - 0,126 \cdot 0,286}{73,033 + 0,375 \cdot 0,192} = 0,975;$$

– теоретически необходимый расход сухого воздуха:

$$L_0 = 0,1151 \cdot (1 + E) \cdot (C^r + 0,375 \cdot S^r); \quad (35)$$

$$L_0 = 0,1151 \cdot (1 + 0,975) \cdot (74,033 + 0,375 \cdot 0,192) = 16,846 \frac{\text{кг}}{1\text{к}} \text{ топлива};$$

– низшая теплотворная способность топлива:

$$Q_H^P = \frac{\sum r_i \cdot Q_i}{100}; \quad (36)$$

$$Q_H^P = \frac{96 \cdot 49933 + 2,0 \cdot 47415 + 1,0 \cdot 46302 + 0,05 \cdot 47327 + 0,1 \cdot 21750}{100} \\ = 49392 \text{ кДж/кг};$$

– газовая постоянная:

$$R = \frac{8,314}{\mu_m}; \quad (37)$$

$$R = \frac{8,314}{16,766} = 0,496 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К};$$

– абсолютное давление продуктов сгорания после ТНД:

$$P_s = P_a + P_{\text{изб}}; \quad (38)$$

$$P_s = 0,0985 + 0,0025 = 0,101 \text{ МПа};$$

– плотность продуктов сгорания за ТНД:

– левый газоход:

$$\rho_L = \rho_{15} \cdot \frac{P_s \cdot 288}{0,0981 \cdot T_s}; \quad (39)$$

					Расчетная часть	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

$$\rho_{\text{Л}} = 1,226 \cdot \frac{0,101 \cdot 288}{0,0981 \cdot 900} = 0,404 \text{ кг/м}^3;$$

– правый газоход:

$$\rho_{\text{П}} = \rho_{15} \cdot \frac{P_s \cdot 288}{0,0981 \cdot T_s}; \quad (40)$$

$$\rho_{\text{П}} = 1,226 \cdot \frac{0,101 \cdot 288}{0,0981 \cdot 900} = 0,404 \text{ кг/м}^3;$$

– расходы продуктов сгорания:

– левый газоход:

$$M_{\text{ПСЛ}} = F_{\text{Л}} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P_{\text{Л}} \cdot 10^6 \cdot \rho_{\text{Л}}}; \quad (41)$$

$$M_{\text{ПСЛ}} = 1,826 \cdot \sqrt{2 \cdot 4,132 \cdot 10^{-4} \cdot 10^6 \cdot 0,404} = 33,36 \text{ кг/с};$$

– правый газоход:

$$M_{\text{ПСП}} = F_{\text{П}} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P_{\text{П}} \cdot 10^6 \cdot \rho_{\text{П}}}; \quad (42)$$

$$M_{\text{ПСП}} = 1,826 \cdot \sqrt{2 \cdot 4,162 \cdot 10^{-4} \cdot 10^6 \cdot 0,404} = 33,49 \text{ кг/с};$$

– полный расход продуктов сгорания:

$$M_{\text{ПС}} = M_{\text{ПСП}} + M_{\text{ПСЛ}}; \quad (43)$$

$$M_{\text{ПС}} = 33,69 + 33,49 = 66,85 \text{ кг/с};$$

– расход воздуха:

$$M_{\text{В}} = M_{\text{ПС}} - B; \quad (44)$$

$$M_{\text{В}} = 66,85 - 0,78 = 66,07 \text{ кг/с};$$

– коэффициент избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{M_{\text{В}}}{B \cdot L_0}; \quad (45)$$

$$\alpha = \frac{66,07}{0,78 \cdot 16,846} = 5,03;$$

– теплоемкость воздуха:

$$C_{P_{\text{В}}} = 0,9379 + 0,000198 \cdot \frac{T_s + T_c}{2}; \quad (46)$$

					<i>Расчетная часть</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		65

$$C_{PB} = 0,9379 + 0,000198 \cdot \frac{900 + 450}{2} = 1,072 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

- температура продуктов сгорания перед ТВД:

$$T_Z = \frac{0,98 \cdot Q_H^P + C_{PB} \cdot (\alpha \cdot L_0 \cdot T_V + T_0)}{C_{PB} \cdot (\alpha \cdot L_0 + 1)}; \quad (47)$$

$$T_Z = \frac{0,98 \cdot 49392 + 1,072 \cdot (5,03 \cdot 16,846 \cdot 600 + 294)}{1,072 \cdot (5,03 \cdot 16,846 + 1)} \\ = 1123,088 \text{ К};$$

- мощность осевого компрессора:

$$N_{OK} = M_B \cdot C_{PB} \cdot (T_C - T_0); \quad (48)$$

$$N_{OK} = 66,07 \cdot 1,072 \cdot (450 - 294) = 11049,02 \text{ кВт};$$

- мощность турбины высокого давления при условии, что ТВД и ОК на одном валу:

$$N_{ТВД} = 1,015 \cdot N_{OK}; \quad (49)$$

$$N_{ТВД} = 1,015 \cdot 11049,02 = 11214,76 \text{ кВт};$$

- теплоемкость продуктов сгорания:

$$C_{P_{ПС}} = 0,9796 + 0,000283 \cdot \frac{T_S + T_C}{2}; \quad (50)$$

$$C_{P_{ПС}} = 0,9796 + 0,000283 \cdot \frac{900 + 450}{2} = 1,171 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

- температура продуктов сгорания за ТВД:

$$T'_S = T_Z - \frac{N_{ТВД}}{M_{ПС} \cdot C_{P_{ПС}}}; \quad (51)$$

$$T'_S = 1123,088 - \frac{11214,76}{66,85 \cdot 1,171} = 979,83 \text{ К};$$

- эффективная мощность ГПА:

$$N_e = M_{ПС} \cdot C_{P_{ПС}} \cdot (T'_S - T_S); \quad (52)$$

$$N_e = 66,85 \cdot 1,171 \cdot (979,83 - 900) = 6249,2 \text{ кВт};$$

- эффективный КПД ГПА:

$$\eta_e = \frac{N_e}{B \cdot Q_H^P}; \quad (53)$$

					Расчетная часть	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

$$\eta_e = \frac{6249,2}{0,78 \cdot 49392} = 0,162.$$

## 6.2 Анализ полученных результатов

По полученным результатам видно, эффективный КПД ( $\eta_e=16,2\%$ ) и эффективная мощность ( $N_e = 6249,2$  кВт) значительно отличаются от паспортных данных (КПД= $28\% \pm 1\%$ ; мощность  $N=10000$  кВт ( $\pm 5\%$ )), следовательно необходимо провести ремонтные работы ГПА.

					<i>Расчетная часть</i>	<i>Лист</i>
						67
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

## 7 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

### 7.1 Расчет нормативной продолжительности выполнения работ

В данной главе рассматривается модель, когда на предприятии в эксплуатации находятся газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом типа ГТК-10-4, наработка которого составляет более 20 лет, в результате чего вышел из строя нагнетатель 370-18-1.

По той причине, рассмотрим замену старого нагнетателя на новый, с аналогичными показателями.

Так как на объекте находятся резервные ГПА бесперебойная перекачка газа не прекращается. Поэтому время на остановку агрегата, вышедшего из строя учитываться в данной работе не будет.

Таблица 4 – Нормы времени на замену нагнетателя

№ п/п	Наименование операций	Продолжительность работ, часов	Состав бригады, человек
1	Оформление документов для допуска к проведению работ по замене нагнетателя	11	3
2	Демонтаж нагнетателя	27,5	6
3	Монтаж нагнетателя	27,5	6
4	Пуск в работу ГПА	1	6
5	Пусконаладочные работы	24	6
	Продолжительность работ	90,4	-

Таблица 5 – График проведения работ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Определение показателей надежности газоперекачивающего агрегата с газотурбинным двигателем			
Разраб.		Тян В. Д.			Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Рудаченко А. В.					68	92
Консульт.						НИ ТПУ гр. 2Б4А		
Рук-ль ООП		Брусник О.В.						

Наименование операции	Всего часов	Дни							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Оформление документов	11								
Демонтаж нагнетателя	27,5								
Монтаж нагнетателя	27,5								
Пуск в работу ГПА	1								
Пусконаладочные работы	24								

## 7.2 Расчет сметной стоимости, осуществляемый ресурсным методом

Состав затрат в соответствии с их экономическим содержанием формируется последующим элементом:

- материальные затраты;
- затраты на оплату труда;
- отчисления на социальные нужды;
- прочие расходы.

Для выполнения поставленной задачи рассчитаем затраты на горюче-смазочные материалы, материалы, оплату труда специалистов отдела ИТР, оплату труда рабочих за время проведения работ, накладные расходы и сметную прибыль предприятия.

Таблица 6 – Затраты на горюче-смазочные материалы

Наименование техники	Марка техники	Количество, ед.	Расход топлива, л/км		Потребность, л		Цена за единицу, руб.	Стоимость ГСМ, руб.
			АИ-92	Дизтопливо	АИ-92	Дизтопливо		
Автокран	Groovert530e	1		37		800	43	34400,0

Продолжение таблицы 5

Вахтовая машина	Урал 42112	1		31		108,5	43	4665,5
Тягач	HINO SS	1		40		123,5	43	5310,5
Автомобиль	УАЗ Патриот	2	20		70		41	2870,0
Итого затрат на топливо:								47246,0

Таблица 7 – Затраты на материалы

Оборудование		
Наименование	Количество	Стоимость, руб
Нагнетатель 370-18-1	1 шт.	10000000,0

Таблица 8 – Затраты на оплату труда рабочих за время проведения работ

Наименование категории работника	Количество работников данной категории, чел.	Трудозатраты, чел./час.	Средняя заработная плата одной вахты с учетом районного коэффициента, 80%, руб.	Фонд заработной платы на весь объем работы, руб.
Начальник отдела	1	19	60000,0	60000,0
Главный инженер	1	51	124000,0	124000,0
Ведущий инженер	1	59	122000,0	122000,0
Инженер категории	1	59	79000,0	79000,0
Руководитель группы	1	59	112000,0	112000,0
Итого:				497000,0

Профессия	Разряд	Кол-во	Часовая тарифная ставка, руб	Норма времени на проведение мероприятия, час	Заработная плата всех работников с учетом районного коэффициента, 80%, руб.
Машинист газоперекачивающего агрегата	VI	6	240	75	172800,0
Крановщик	VI	1	200	55	17600,0
Водитель	VI	4	230	20	29440,0
Итого:					219840,0

### 7.3 Отчисления на социальные нужды

Отчисления на страховые взносы осуществляется в размере 30% от всего (ФЗП) фонда заработной платы.

На 2018 плательщик должен перечислить в фонды проценты по следующим ставкам:

- 22% в Пенсионный фонд;
- 2,9% в Фонд социального страхования;
- 5,1% в Федеральный фонд общего медицинского страхования.

Согласно сводному отчёту по заработной плате (табл.) фонд заработной платы (ФЗП) составляет 716840 руб. Рассчитаем сумму каждого отчисления.

Отчисление в Пенсионный фонд:

$$Зпф = Зфзп \cdot 0,22 = 716840 \cdot 0,22 = 157704,8 \text{ руб.}$$

Отчисление в Фонд социального страхования (ФСС):

$$Зфсс = Зфзп \cdot 0,029 = 716840 \cdot 0,029 = 20788,4 \text{ руб.}$$

Отчисление в Фонд медицинского страхования (ФМС):

$$Зфмс = Зфзп \cdot 0,051 = 716840 \cdot 0,051 = 36558,8 \text{ руб.}$$

#### 7.4 Оценка эффективности

На проведение мероприятия по замене нагнетателя газоперекачивающего потребуется **10979238,0 руб.** Учитывая, что данное капиталовложение обеспечит стабильную и бесперебойную работу производства на ближайшие 25-30 лет, проект является выгодным для производств со старой технической базой.

					<i>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		72

## 8. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

### 8.1 Введение

Компрессорная станция магистрального газопровода является комплексом инженерных сооружений, обеспечивающих основные технологические процессы – транспортировку, очистку, охлаждение газа.

В данном разделе рассматривается деятельность сменного инженера с точки зрения безопасности жизнедеятельности. Продолжительность рабочего дня сменного инженера, в соответствии со штатным расписанием на КС, составляет 11 часов. В соответствии с должностными инструкциями сменный инженер должен постоянно находиться на главном щите управления (ГЩУ).

Важнейшей задачей при производстве работ по повышению эксплуатационной надежности газотурбинного газоперекачивающего агрегата является соблюдение правил и требований производственной и экологической безопасности.

### 8.2 Производственная безопасность

Рассмотрим основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы при выполнении работ по повышению эксплуатационной надежности газотурбинного газоперекачивающего агрегата в таблице 1.

Таблица 9 - Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы при выполнении работ по повышению эксплуатационной надежности газотурбинного газоперекачивающего агрегата.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
					<i>Определение показателей надежности газоперекачивающего агрегата с газотурбинным двигателем</i>		
Разраб.		Тян Д. В.			Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Рудаченко А. В.				73	92
Консульт.					<i>Социальная ответственность</i>		
Рук-ль ООП		Брусник О.В.					
					<i>НИ ТПУ гр. 2Б4А</i>		

Наименование видов работ	Факторы (ГОСТ 12.0.003-88)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1	2	3	4
Ремонтновосстановительные работы при выполнении работ по повышению эксплуатационной надежности газотурбинного газоперекачивающего агрегата	Физические		
		Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования	ГОСТ 12.0.003 -74 ССБТ
	Электрический ток		
		Повышенное значение напряжения	ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ
		Оборудование и трубопроводы, работающие под давлением	ГОСТ 12.2.003–92 ССБТ
	Отклонение показателей микроклимата на открытом воздухе, рабочей зоны		СанПиН 2.2.4.548-96 СНиП 2.04.05.86
	Превышение уровней шума		ГОСТ 12.1.003–2014 ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ
	Превышение уровней вибрации		ГОСТ 12.1.012–2004 ССБТ СН 2.2.4/2.1.8.566-96
	Превышение уровней ионизирующих излучений		СП 2.6.1–758–99
	Недостаточная освещенность рабочей зоны		СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 СП 52.13330.2011
	Химические		

Продолжение таблицы 9

	Повышенная запыленность и загазованность рабочей зоны		ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ
	Биологические		
	Повреждения в результате контакта с животными, насекомыми, пресмыкающимися		ГОСТ 12.1.008-78 ССБТ

### 8.2.1 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

Рассмотрим вредные производственные факторы, которые действуют или могут воздействовать на организм человека при проведении работ по повышению эксплуатационной надежности газотурбинного газоперекачивающего агрегата, а также нормативные значения этих факторов и мероприятия, направленные на снижение или устранение этих факторов.

Отклонение показателей микроклимата на открытом воздухе, рабочей зоны на здоровье человека существенное влияние оказывают микроклиматические условия производственной среды, которые складываются из температуры окружающего воздуха, его влажности, скорости движения и излучений от нагретых предметов.

Работающие на открытом воздухе должны быть обеспечены в зимнее время спецодеждой и спецобувью с повышенным суммарным тепловым сопротивлением, а также защитными масками для лица. При работах, связанных с ограниченностью движения, следует применять спецодежду и спецобувь со специальными видами обогрева [24].

Работники должны быть обучены мерам защиты от обморожения и оказанию доврачебной помощи.

#### *Превышение уровней шума*

Допустимый уровень шума составляет 80 дБА. Запрещается даже кратковременное пребывание в зоне с уровнями звукового давления, превышающими 135 дБА [25].

К коллективным средствам и методам защиты от шума относятся:

- совершенствование технологии ремонта и своевременное обслуживание оборудования;
- использование средств звукоизоляции (звукоизолирующие кожухи);
- использование средств звукопоглощения.

Также необходимо использовать рациональные режимы труда и отдыха работников.

Для создания нормальных условий работы дежурного персонала управление вынесено на блочные щиты.

Источниками шума в ГПА с газотурбинным приводом являются компрессор, выхлоп турбины, корпус ГТУ и камеры сгорания, нагнетатель с присоединяемыми трубопроводами и другое вспомогательное оборудование ГТУ и КС.

Шум на ГЩУ, создаваемый системами управления цеха, работой персональных компьютеров, не превышает нормативные уровни шума.

Сменный персонал может находиться на ГЩУ в течение всей рабочей смены без СИЗ органов слуха [26].

#### *Превышение уровней вибрации*

Для ГЩУ в соответствии с СН 2.2.4/2.1.8.566-96 [28] вибрация соответствует 3 категории типа «в» - технологическая вибрация, воздействующая на оператора на рабочих местах стационарных машин или передающиеся на рабочие места, не имеющие источников вибрации. На ГЩУ вибрация не превышает предельно допустимые величины нормируемых

					<i>Социальная ответственность</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		76

параметров вибрации рабочих мест при длительности вибрационного воздействия 8 ч.

Используемые средства и методы защиты от вибрации:

- здание ГЩУ находится отдельно и не связано со зданиями ГТУ.

Значения уставки, определяющие предупреждающий и аварийный сигнал уровня вибрации, выводятся на ГЩУ с помощью программных средств. Абсолютные значения уставок уменьшаются с увеличением срока службы агрегата, так как ухудшается техническое состояние агрегата и вспомогательного оборудования.

Для обеспечения вибробезопасных условий труда при сборке и монтаже агрегата выполняется [29]:

- центровка роторов;
- балансировка роторов.

#### *Превышение уровней ионизирующих излучений*

Основные профилактические мероприятия: уменьшение времени пребывания в зоне радиации; увеличение расстояния от источника излучения до работающего; установка защитных экранов; применение аппаратов с дистанционным управлением и другие.

Работающие с радиоактивными веществами должны быть обеспечены СИЗ от ионизирующих излучений в соответствии с санитарными правилами при работе с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений.

#### *Недостаточная освещенность рабочей зоны*

Для освещения зданий используются искусственные и естественные источники света.

Естественное освещение на ГЩУ 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.

					Социальная ответственность	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		77

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.

#### *Повышенная запыленность и загазованность рабочей зоны*

Контроль воздушной среды должен проводиться в зоне дыхания при характерных производственных условиях посредством газоанализатора или рудничной лампы. Содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны не должно превышать предельно допустимых концентраций (ПДК).

При работе в местах, где концентрация вредных веществ в воздухе может превышать ПДК, работников должны обеспечивать соответствующими противогазами.

Уменьшение неблагоприятного воздействия запыленности и загазованности воздуха достигается за счет регулярной вентиляции рабочей зоны.

#### *Повреждения в результате контакта с животными, насекомыми, пресмыкающимися*

В летнее время года, работающие на открытом воздухе должны быть обеспечены за счет предприятия СИЗ от гнуса и энцефалитного клеща [35].

### **8.2.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению**

Рассмотрим опасные производственные факторы, которые действуют или могут воздействовать на организм человека при проведении работ по повышению эксплуатационной надежности газотурбинных газоперекачивающих агрегатов, а также нормативные значения этих факторов и мероприятия, направленные на снижение или устранение этих факторов.

					Социальная ответственность	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		78

### *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 прикосновения к ним работающего или использованы другие средства (например двуручное управление), предотвращающие травмирование.

Также необходимо соблюдать технику безопасности при работе оборудования, машин и механизмов, а их эксплуатацию должны выполнять только лица, имеющие на это право [17].

### *Электрический ток, повышенное значение напряжения*

ГЩУ по степени опасности поражения персонала электрическим током относится по ГОСТ 12.1.019-79 [18] к помещениям с повышенной опасностью:

- повышенная влажность (более 75 %) или высокая температура (выше 35 °С);
- возможность одновременного соприкосновения человека с имеющими соединение с землей металлоконструкциями здания, механизмами с одной стороны и металлическим корпусом оборудования с другой стороны;
- токопроводящие полы.

Для питания производственного оборудования ГЩУ применяется напряжение 220 В. Потребителями электроэнергии на ГЩУ являются:

- компьютер;
- пульт управления;
- шкафы управления.

Для защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током, от действия электрической дуги и т. п. все электроустановки должны быть снабжены средствами защиты, а также средствами оказания первой помощи в

					Социальная ответственность	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		79

соответствии с правилами применения и испытания средств защиты, используемых в электроустановках.

Защитное заземление или зануление, в соответствии с ГОСТ 12.1.030-81, должно обеспечивать защиту людей от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции.

В соответствии с правилами устройства электроустановок выполнена защита электрооборудования, электропроводки (в том числе заземления) от механических воздействий, проникновения растворителей. При этом все ограждающие и закрывающие устройства обладают в соответствии с местными условиями достаточной механической прочностью. Устройства, предназначенные для защиты проводов и кабелей от механических повреждений, по возможности должны быть введены в машины, аппараты и приборы.

Источниками энергии на КС являются:

- высоковольтные подстанции энергетических систем, расположенных в районе КС;
- малые электростанции собственных нужд, приводом электрогенератора на которых является один из ГПА или специальная энергетическая ГТУ;
- аварийные аккумуляторы, используемые в случае аварии.

Исключение возникновения опасных ситуаций при полном или частичном прекращении энергоснабжения достигается аварийных дизельных генераторов или передвижных автоматических электростанций. Станционная автоматика, осуществляет автоматическое переключать источники электроснабжения.

*Оборудование и трубопроводы, работающие под давлением*

При несоблюдении правил безопасности при изготовлении, монтаже и эксплуатации оборудование, работающее под высоким давлением, обладает повышенной опасностью.

Причинами разрушения или разгерметизации систем повышенного давле-

					Социальная ответственность	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		80

ния могут быть: внешние механические воздействия, старение систем (снижение механической прочности); нарушение технологического режима; конструкторские ошибки; изменение состояния герметизируемой среды; неисправности в контрольно-измерительных, регулирующих и предохранительных устройствах; ошибки обслуживающего персонала.

Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования, работающего под давлением, распространяются:

- работающие под давлением пара или газа свыше 0,07 МПа;
- на баллоны, предназначенные для транспортирования и хранения сжатых, сжиженных и растворенных газов под давлением свыше 0,07 МПа;
- на цистерны и бочки для транспортирования и хранения сжиженных газов, давление паров которых при температуре до 50 °С превышает давление 0,07 МПа;
- на цистерны и сосуды для транспортирования или хранения сжатых, сжиженных газов, жидкостей и сыпучих тел, в которых давление выше 0,07 МПа создается периодически.

Основным требованием к конструкции оборудования работающего под высоким давлением является надежность обеспечения безопасности при эксплуатации и возможности осмотра и ремонта. Специальные требования предъявляются к сварным швам. Они должны быть доступны для контроля при изготовлении, монтаже и эксплуатации, располагаться вне опор сосудов. Сварные швы делаются только стыковыми.

Ответственность за исправное состояние и безопасную эксплуатацию сосудов должна быть возложена на специалиста, которому подчинен персонал, обслуживающий сосуды (начальник компрессорной, начальник участка, старший мастер участка и т. д.).

					<i>Социальная ответственность</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		81

### 8.3 Экологическая безопасность

Рассмотрим воздействие вредных факторов на окружающую среду и природоохранные мероприятия [36-37] при выполнении работ по повышению эксплуатационной надежности газотурбинного газоперекачивающего агрегата.

#### *Литосфера*

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 выше перечисленным инструкциям. Места сбора и накопления отходов должны быть оборудованы углекислотными огнетушителями, ящиками с песком, лопатой, войлоком, кошмой или асбестом.

#### *Гидросфера*

Негативное воздействие на гидросферу - 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 обо-

					<i>Социальная ответственность</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		82

рудованным 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.

#### *Атмосфера*

Негативное воздействие на атмосферу - выбросы природного газа, сжигание отходов производства, выхлопные газы ГТУ, выбросы пыли и токсичных газов из используемых машин и оборудования

Природоохранные мероприятия:

- 1) Для уменьшения выбросов окислов азота соблюдается оптимальный режим горения в камере сгорания, а также контролируется скорость прохождения через зону горения. Для уменьшения локальных нарушений микроклимата тепло должно рассеиваться в слоях атмосферы, удалённых от поверхности земли с помощью дымовых труб.
- 2) Поддержание всего транспортного парка в исправном состоянии, осуществление постоянного контроля на соответствие требованиям нормативов уровня выбросов в атмосферу оксидов азота и окиси углерода в составе выхлопных газов и регулировка двигателей.

#### *Окружающий мир*

Негативное воздействие на окружающий мир - распугивание, нарушение мест обитания животных, рыб и других представителей животного мира, случайное уничтожение.

Природоохранные мероприятия:

Необходимо применение щадящих технологий при производстве работ и

					<i>Социальная ответственность</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		83

прогрессивных методов пользования ресурсами фауны, заключающихся в следующем: ограничить применение техники с большим удельным давлением на грунт, разрушающим почвенный покров, а также подземные ходы, норы, убежища животных.

#### 8.4 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.

На КС возможно возникновение следующих чрезвычайных ситуаций:

- разрыв газопровода и утечка газа на территории КС или узла подключения;
- пожар на территории КС;
- пожар на технологических установках;
- пожар в отсеке двигателя;
- пожар в отсеке нагнетателя.

Для предотвращения возникновения аварийных ситуаций необходимо:

- строгое соблюдение технологического процесса;
- строгое соблюдение правил техники безопасности, инструкций, нормативов по пожарной охране и промышленной санитарии;
- предотвращение образования взрывоопасных концентраций;
- своевременное проведение профилактических мероприятий и поддержание надёжной работы оборудования;
- контролировать правильность действий персонала, проверять уровень знаний и повышать квалификацию персонала.

Для ликвидации пожаров на территории КС имеется пожарная часть.

					<i>Социальная ответственность</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		84

На каждом производственном участке, на видном месте вывешена табличка с указанием фамилии, имени, отчества и должности лица, ответственного за пожарную безопасность.

Производственная территория и помещения не должны загрязняться легковоспламеняющимися и горючими жидкостями, а также мусором и отходами производства.

При всех возникших ЧС персонал, не участвующий в ликвидации последствий должен эвакуироваться согласно утвержденному плану. Эвакуация людей в соответствии с планом эвакуации при чрезвычайных ситуациях происходит согласно СНиП 21-01-02 через ближайший безопасный, с точки зрения места возникновения пожара, лестничный пролет на улицу. Кроме того, для снижения последствий той или иной аварии должно быть организовано систематическое обучение персонала КС действиям во время чрезвычайных ситуаций.

### **8.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Согласно нормативным документам, для допуска к работе на ГРС лицам, достигнувшем 18 лет необходимо:

- пройти медицинский осмотр и не иметь противопоказаний;
- обучиться безопасным методам ведения работы;
- пройти инструктаж на рабочем месте;
- получить допуск к самостоятельной работе.

Все работники обязаны пользоваться спецодеждой, спецобувью, и иными средствами индивидуальной защиты в соответствии с нормами.

Рабочему персоналу делают надбавку к заработной плате в размере не менее 4% от оклада и оплачивают дополнительный отпуск в размере 7 календарных дней, в связи с работой во вредных или опасных условиях труда. Работники имеют право на досрочную пенсию, а работодатель обязан перечислять повышенные взносы в пенсионный фонд.

					<i>Социальная ответственность</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		85

Для наиболее безопасного и эффективного ведения работ рабочее место должно быть правильно организовано. Это касается как расположения предметов на рабочем столе, так и расстановки оборудования на всей территории КС. Должен быть обеспечен наиболее удобный и быстрый доступ к оборудованию. Также необходимо обеспечить рациональное размещение зданий и сооружений КС.

					<i>Социальная ответственность</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		86

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной выпускной квалификационной работы были рассмотрены технические решения по увеличению надежности ГТД в процессе его эксплуатации.

В ходе выполнения работы были решены следующие задачи:

- ✓ Проведен анализ неисправностей основных узлов ГТУ, возникающих в процессе эксплуатации
- ✓ Определен наиболее эффективный метод диагностики ГТУ

Метод параметрической диагностики позволяет оценить эффективность функционирования ГТУ и распознать причины снижения эффективности и неисправностей, их определяющих без остановки агрегата. Неоспоримым преимуществом параметрической диагностики является тот факт, что ни один из других диагностики методов не способен достоверно математически описать контролируемый процесс

- ✓ Выявлен путь повышения эксплуатационной надежности ГПА на компрессорной станции, за счет перехода формы ТО с ППР на обслуживание по фактическому состоянию

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Определение показателей надежности газоперекачивающего агрегата с газотурбинным двигателем			
Разраб.		Тян В. Д.			Заключение	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Рудаченко А. В.					87	92
Консульт.						НИ ТПУ гр. 2Б4А		
Рук-ль ООП		Брусник О.В.						

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Терентьев А.Н., Седых З.С., Дубинский В.Г. / Надежность газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. М., Недра, 1979. – с. 207.
2. Козаченко А.Н. / Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов. М.: Нефть и газ, 1999. – 463 с. ISBN 5-7246-0055-2
3. Корж В.В. Эксплуатация и ремонт оборудования насосных и компрессорных станций [Текст]: учеб. пособие/ В.В. Корж, А.В. Сальников – Ухта: УГТУ, 2010. – 184с.
4. Кунина П.С., Павленко П.П. / Диагностика газоперекачивающих агрегатов с центробежными нагнетателями. Ростов-на-Дону, изд-во РГУ, 2001. – 362 с.
5. Рудаченко А.В., Чухарева Н.В. / Газотурбинные установки транспорта природного газа: учебное пособие; Томск: Издательство ТПУ 2012. – 213 с.
6. Иванов В. А. Справочник мастера строительно-монтажных работ. М.: «Инфра-Инженерия», 2007. – 832 с.
7. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов.
8. Бородавкин П. П. / Механика грунтов, Учебник для ВУЗов. – Москва, «Недра-Бизнесцентр», 2003.
9. Поршаков Б.П., Апостолов А.А., Никишин В.И. / Газотурбинные установки на газопроводах. М: ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. — 240 с.
10. Шамазов А.М., Александров В.Н., Гольянов А.И., Коробков Г.Е., Мастобаев Б.Н. / Проектирование и эксплуатация насосных и компрессорных станций. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр» 2003. – 404 с.

					<i>Определение показателей надежности газоперекачивающего агрегата с газотурбинным двигателем</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		Тян В. Д.			<i>Список используемых источников</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		Рудаченко А. В.					88	92
<i>Консульт.</i>						<i>НИ ТПУ гр. 2Б4А</i>		
<i>Рук-ль ООП</i>		Брусник О.В.						

11. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. / Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок. Системы. Серия: «Газотурбинный двигатели». М. – «Машиностроение», 207 – 194 с.
12. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
13. СТО 172302282.27.040.002-2008. Газотурбинные установки. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. – М.: 2008. — 77 с.
14. СТО Газпром 2-2.3-681-2012. Компрессорные станции. Газоперекачивающие агрегаты. Порядок проведения технического обслуживания и ремонта. – М.: 2014. — 545 с.
15. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
16. ГОСТ 12.1.019-79. ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
17. ГОСТ 12.1.030-81. ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
18. ГОСТ 12.2.003-92. ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
19. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).

					<i>Список используемых источников</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		89

20. ППБ 01-2003. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
21. НПБ 110-99. Перечень зданий, сооружений, помещений и оборудования, подлежащих защите автоматическими установками пожаротушения и автоматической пожарной сигнализацией. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
22. СНиП 21-01-02-85. Противопожарные нормы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
23. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
24. СНиП 2.04.05-86. Отопление, вентиляция и кондиционирование. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
25. ГОСТ 12.1.003–2014. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
26. ГОСТ 12.1.029-80. ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
27. ГОСТ 12.1.012–2004. ССБТ. Вибрационная болезнь. Общие требования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
28. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
29. СП 2.6.1–758–99. Нормы радиационной безопасности, НРБ–99. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата

					<i>Список используемых источников</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		90

- обращения 10.05.2018 г.).
30. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
  31. СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
  32. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
  33. ГОСТ 12.1.008-78. ССБТ. Биологическая безопасность. Общие требования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
  34. ГОСТ 17.1.3.06-82. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране подземных вод. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
  35. ГОСТ 17.1.3.13-86. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
  36. РД 51-100-85. Руководство по нормированию выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на объектах транспорта и хранения газа. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
  37. ГОСТ Р 22.3.03-94. Безопасность в ЧС. Защита населения. Основные положения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
  38. ГОСТ Р 22.0.07-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники техногенных чрезвычайных ситуаций. Классификация и номенклатура

					<i>Список используемых источников</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		91

- поражающих факторов и их параметров. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
39. ГОСТ 21889-76. Система "Человек-машина". Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
40. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).
41. Р 2.2.2006-05. Гигиена труда. Руководство, по гигиенической оценке, факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/docs.cntd.ru> (дата обращения 10.05.2018 г.).

					<i>Список используемых источников</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		92